Издательство «Знание»

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ

Новое в жизни, науке, технике

Подписная научно-популярн серия

Издается ежемесячно с 1988 г.

Технологическая база информатики

1989

2

Новое
в жизни,
науке,
технике

Подписная
научно-
популярная
серия

2/1989

Издается
ежемесячно
с 1988 г.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БАЗА ИНФОРМАТИКИ

В НОМЕРЕ:

3 *В. Ф. Дорфман*
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС

39 *В. С. Барсуков, О. В. Тарасов*
НОВАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ: ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ, КОНЦЕПЦИЯ БАНКА ЗНАНИЙ, ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ

ЗАДАЧИ УЧЕНЫХ

45 XI ВСЕСОЮЗНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Издательство
«Знание»
Москва
1989

ББК 73
Т 38

Авторы выпуска

ДОРФМАН Вениамин Фриделевич — доктор технических наук, специалист в области микроэлектронной технологии. Имеет более 100 печатных работ в этой области.

БАРСУКОВ Вячеслав Сергеевич — кандидат технических наук, специалист в области информационной технологии. Имеет свыше 70 публикаций, в том числе 13 изобретений.

ТАРАСОВ Олег Владимирович, кандидат технических наук, имеет ряд публикаций по вычислительным сетям, диалоговым системам и др.

НОСОВ Юрий Романович, доктор технических наук, профессор, лауреат государственных премий.

Редактор Б. М. ВАСИЛЬЕВ

© Издательство «Знание», 1989 г.

Еще недавно технология рассматривалась как простой набор рецептур и считалась чем-то вторичным по отношению к культуре и науке. Но сейчас все яснее осознается, что совершенствование технологии лежит в основе развития цивилизации, а радикально новые формы человеческой культуры всегда сопряжены с рождением принципиально новых технологий.

В. Ф. ДОРФМАН

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС

Прелюдия

В XX веке новые технологии родились целым ансамблем: биотехнология молекулярно-генетического уровня, технология органического синтеза искусственных веществ с заданными свойствами (в частности, лекарственных препаратов), технология искусственных конструкционных материалов (пластмассы, синтетические волокна, композиты и т. д.), мембранная технология искусственных кристаллов и сверхчистого вещества, лазерная, ядерная, космическая технологии, технология поддержания экологического равновесия и создания новых экологических систем и, наконец, информационная технология, материальное ядро которой образует микроэлектроника.

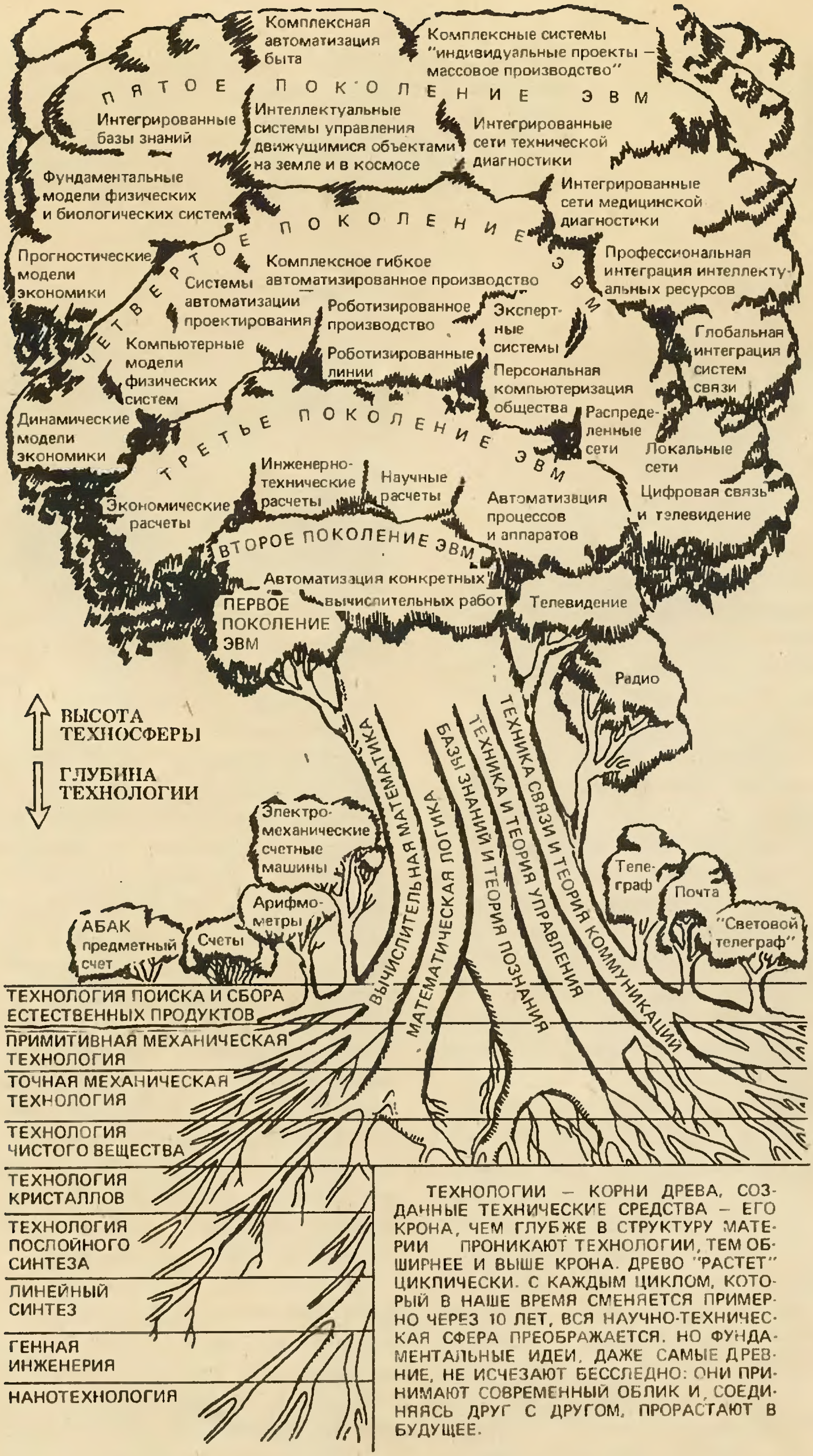
Микроэлектроника формирует элементную базу всех современных средств приема, передачи и обработки информации, систем управления и связи. Если говорить обобщенно, то она представляет «мозг», «нервную систему» и «органы чувств» информатики, кибернетики, робототехники. Она же является технологическим лидером современности, поскольку выпускает наиболее сложную, совершенную и массовую продукцию.

Почти все науки обретают реальную жизнь, приносят реальную пользу обществу, материализуясь через технологию, для многих наук микроэлектроника служит первичным источником. В конце концов степень развития технологии наряду с духовными ценностями служит мерилом развития человеческой культуры, составляет основной капитал общества, нации. Информатика, информационная технология, микроэлектроника не только формируют передний фронт научно-технического прогресса, они создают информационный фундамент развития всех остальных технологий, включая технологии социального управления. Они вторгаются во все сферы нашей жизни, от повседневности и быта до грандиозных перспективных программ всестороннего развития страны.

Искусственный мир, создаваемый человеком, усложняется ускоряющимися темпами, и в помощь естественному интеллекту человека, чей творческий потенциал вызвал к жизни эти бурные процессы, зарождаются средства искусственного интеллекта. Их физической основой служат интегральные схемы — кристаллические устройства, в которых тысячи и даже миллионы приборов обрабатывают гигантские потоки информации. Уже выпускаются кристаллы, вычислительная производительность которых выше, чем совокупная вычислительная способность невооруженного современной техникой населения любой державы, и супер-машины, производительность каждой из которых на порядок выше вычислительной производительности всего населения планеты.

Случилось так, что одна из величайших научно-технологических революций связана не с гигантскими сооружениями, а с микроскопическими кристаллами, самый большой из которых могла бы взять с собой в полет пчела.

Микроэлектроника возникла первоначально именно как технология. Практически сразу после появления первых работоспособных транзисторов стало ясно, что в едином кристаллическом устройстве можно сформировать все основные элементы электронных схем. Так был проинтегрирован арсе-



ТЕХНОЛОГИИ — КОРНИ ДРЕВА, СОЗДАННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА — ЕГО КРОНА, ЧЕМ ГЛУБЖЕ В СТРУКТУРУ МАТЕРИИ ПРОНИКАЮТ ТЕХНОЛОГИИ, ТЕМ ОБШИРНЕЕ И ВЫШЕ КРОНА. ДРЕВО "РАСТЕТ" ЦИКЛИЧЕСКИ. С КАЖДЫМ ЦИКЛОМ, КОТОРЫЙ В НАШЕ ВРЕМЯ СМЕНЯЕТСЯ ПРИМЕРНО ЧЕРЕЗ 10 ЛЕТ, ВСЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ СФЕРА ПРЕОБРАЖАЕТСЯ. НО ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИДЕИ, ДАЖЕ САМЫЕ ДРЕВНИЕ, НЕ ИСЧЕЗАЮТ БЕССЛЕДНО: ОНИ ПРИНИМАЮТ СОВРЕМЕННЫЙ ОБЛИК И, СОЕДИНЯЯСЬ ДРУГ С ДРУГОМ, ПРОРАСТАЮТ В БУДУЩЕЕ.

нал технологических средств в одном процессе и арсенал элементов электронных схем в одном кристалле. Родившаяся технология была названа интегральногрупповой, а ее продукция — интегральной схемой.

Фактически же были проинтегрированы не просто полезные приемы: синтез вещества и его кристаллической структуры, деталей и целого изделия, нелинейных физических явлений и основанных на них приборов, преобразующих отдельные информационные сигналы, и связи, объединяющие эти элементы в стройную систему,— все это слилось, образуя единый согласованный организм. И организм технологии не только ожил, он приобрел новую способность к эволюции.

Обратимся к количественным показателям. Хотя они и не раскрывают существа технологических преобразований, но не оставляют сомнений в глобальности происходящих событий. Приведем некоторые данные, которые могут служить индексами уровня информационной технологии для трех этапов: середины 60-х гг., когда впервые началось крупнопромышленное производство интегральных схем, конца 80-х гг. (планируемого уровня 1990 г.), т. е. четверть века спустя после этих событий, и прогнозируемый уровень 2000 г. (см. таблицу).

Технологический инструментарий микроэлектроники

Любая технологическая система, как и система научная, опирается на

Таблица

Показатель	Абсолютные значения (приближ. оценка)			Фактор прогресса		
	1965 г.	1990 г.	2000 г.	1965 г.	1990 г.	2000 г.
Разрешающая способность технологии, мкм	7—10	0,8—1,2	0,3—0,5	1	10	25
Диаметр подложки, см	25	150	200	1	6	8
Плотность дислокации, на $см^2$	10^4	10	1	1	1000	10000
Случайные примеси, $см^{-3}$	10^{15}	10^{12}	10^{11}	1	10000	10000
Площадь чипа, $см^2$	0,01	1,0	10	1	100	1000
То же, максимум, см	0,04	2,0	100	1	50	250
Степень интеграции; транзисторы-кристалл	10	10^6	10^8	1	100 тыс.	100 млн.
То же, максимум	30	$3 \cdot 10^7$	10^9	1	1 млн.	30 млн.
Эквивалентная цена, доллар/транзистор	1	10^{-5}	10^{-7}	1	100 тыс.	10 млн.
Эквивалентный объем мирового производства, транзисторы/год	10^9	10^{15}	10^{18}	1	1 млн.	100 млн.
Производительность ЭВМ, операции/с, средн.	$3 \cdot 10^4$	10^7	10^9	1	300	30000
То же, максимум	$5 \cdot 10^6$	10^{10}	10^{12}	1	1000	100000
Мировой парк ЭВМ, шт.	$3 \cdot 10$	10	около 10	1	30000	100000
Производительность мирового парка, оп/с	10^9	10^{15}	10^{18}	1	1 млн.	1 млрд.
Число различных применений продукции микротехнологии	около 100	200000	1 млн.			

совокупность недоказываемых, очевидных положений. Каждое из них — неотъемлемая часть фундамента всей системы. Если его изъять, система рухнет, если заменить — получим качественно новую систему. В этих исходных положениях скрыты все перспективы технологии, ее пределы, от них зависит, когда на смену ей придет новая технология, ибо ни одна сложившаяся технология не уходит с основной сцены, не выработав свой ресурс. В данном случае речь идет о жизненной силе и творческом потенциале микротехнологии и микроэлектроники, их временных границах, за которыми становится и реальным, и неизбежным наступление эры нанотехнологии и совершенно новых средств взаимодействия человека с миром знаний.

Для микротехнологии и элементной базы современной информатики основные аксиомы прежде всего сводятся к следующему:

оптимальные электромагнитные элементы и устройства могут быть созданы на основе твердотельных структур;

любая твердотельная структура поддается условному разделению параллельными плоскостями на слои достаточно тонкие, для того чтобы каждый из них на любом участке имел практически однородное распределение атомов по толщине;

каждый из указанных слоев можно получить, локализируя физико-химические процессы формирования твердого тела (его состава и структуры) на отдельных участках его поверхности в соответствии с проектируемой геометрией твердотельного прибора или устройства;

повторяя процесс синтеза слой за слоем и последовательно совмещая их геометрию, можно создать твердотельное устройство с любой проектируемой геометрией.

Рассмотрим, какими средствами микротехнология создает свою, самую сложную и совершенную в мире продукцию. Будем продвигаться шаг за шагом, восходя по технологической лестнице ко всем более изощренным методам. На каждом этапе нашего продвижения мы как бы овладеваем новым технологическим арсеналом, и на каждом этапе накопленный арсенал позволяет создавать самостоятельную полезную продукцию.

Для микроэлектроники и микротехнологии важнейшим исходным понятием является твердое тело. Микротехнология возникла как способ создания твердотельных информационных структур, и сегодня она остается твердотельной технологией.

Но в действительности в своем пока ограниченном ареале она создает фундамент новой технологической формации, совершенно преображая методы, средства, аппаратуру. Начинается микротехнология прежде всего с чистоты — чистоты производства и чистоты всех используемых веществ. В основе всех ее производственных процессов — от вспомогательных реагентов до кристаллов интегральных схем — сверхчистое вещество. Стандартный полупроводниковый кремний содержит не более одного атома примеси на миллиард атомов кремния. Рекордно чистые кристаллы содержат в тысячи раз меньше примесей. Такая чистота представляет собой необходимое жизненное условие в мире электромагнитных сигналов: например, оптическое волокно километровой длины прозрачнее оконного стекла толщиной в несколько миллиметров.

Микротехнология базируется на монокристаллах. Монокристалл — как бы «упорядоченный вакуум»: строгий порядок атомов в кристалле обеспечивает свободный полет электронов в нем, хотя и на малые, но вполне достаточные расстояния для полезной реализации множества физических явлений. Анизотропия кристаллов чрезвычайно важна для создания магнитных, оптических и акустических приборов.

Как мы увидим, эти свойства монокристаллов не менее ценны и для микротехнологии. Особо важны кристаллы с решеткой типа алмаза — самой «рыхлой», но самой жесткой из всех, а среди них — кристаллы кремния. В микротехнологии используются почти исключительно искусственно вы-

ращенные кристаллы: только таким образом удается достичь необходимого структурного совершенства, чистоты и содержания только требуемых малых примесей в кристаллах. Да и большинства используемых кристаллов в природе просто не существует.

Синтез искусственных кристаллов — одна из интереснейших и многоплановых областей современной технологии. Однако это еще не микротехнология, а лишь необходимая основа для нее.

Особое значение для микротехнологии имеют внутренние и наружные плоскости кристалла. Атомы в решетке кристалла «выложены» строгими плоскостями. Это и определяет анизотропию его свойств. Обычно кристалл естественно ограняется плоскостями спайности, параллельными его внутренним (кристаллографическим) плоскостям. Для технических приложений необходимы совершенные наружные плоскости, строго ориентированные в заданном направлении. Для этого кристалл разрезают соответственно требуемым размерам и направлениям, например алмазными пилами. Так получается подложка — плоскопараллельная пластина толщиной обычно 200—500 мкм, на поверхности которой и разворачиваются сложные процессы формирования структуры твердотельных приборов и устройств.

Поверхность — это одно из самых фундаментальных понятий для технологии, физики, проектирования и для исследования твердотельных приборов и устройств. Оно включает не только геометрическую характеристику наружной поверхности кристалла, но и характеризует кристаллическое совершенство прилегающих к поверхности атомных «плоскостей», их чистоту и даже состояние электронов в этих слоях, а также, разумеется, чистоту самой поверхности, причем не только от посторонних частиц, но даже от адсорбированных атомов и ионов. Физика, технология и аппаратные средства подготовки и исследования такой поверхности принадлежат к наиболее сложным и совершенным научно-техническим аспектам современности.

Создание транзистора, возникновение микроэлектроники, планарной технологии и практически всех новейших областей электронного приборостроения стали возможными только на базе определенного уровня знаний о поверхности и методов ее обработки.

Когда в самом начале века Ирвинг Ленгмюр ввел представление о молекулярных силах, определяющих необычные свойства поверхности, это открытие сравнивали с теорией пространства-времени Эйнштейна: в то время как Эйнштейн открыл «четырехмерное пространство», Ленгмюр обнаружил таинственный «двухмерный мир» поверхностных явлений, писали в то время.

Пленка — это как бы материализованная поверхность твердого тела. Идеально согласуясь с принципами послойного планарного синтеза, тонкие пленки несут в микротехнологии фундаментально важные функции. Нанесенная на поверхность твердого тела, она может совершенно преобразовывать его свойства и проявлять свои собственные, полезные для практических применений (например, мембраны, применяемые в синтезаторах звука и других устройствах информационной техники, в медицине, в химической технологии; защитные покрытия, особенно стремительно развивающиеся в последнее десятилетие алмазоподобные защитные пленки и т. д.).

Пленки наносят самыми различными методами: из растворов, эмульсий, расплавов, газовой фазы, потоков свободно летящих в вакууме молекул, атомов, ионов, с активным физико-химическим участием подложки или лишь при наличии слабых (вандерваальсовых) сил взаимодействия с нею осаждаемого вещества. Пленка может быть металлической, полупроводящей или диэлектрической, она может быть даже жидкой или жидкокристаллической. Толщину пленок в зависимости от назначения варьируют в широких пределах: от единиц нанометров до десятков микрометров.

Свойства пленок субмикрометрового диапазона зависят от толщины (так называемые размерные эффекты), а более толстых обычно не отличаются от свойств массивных твердых тел.

Наносить тонкие пленки на поверхность различных изделий научились еще творцы древних цивилизаций. Например, для создания искусственной бирюзы на Ближнем Востоке уже в 5-м тысячелетии до н. э. была разработана сложная технология последовательного нанесения тонких пленок. Однако в процессах синтеза твердотельных структур на плоских подложках, т. е. технологии «двухмерной» по существу, роль таких «двухмерных» объектов, как тонкие пленки, совершенно исключительна. Сама структура твердотельных приборов и устройств формируется последовательным нанесением тонких пленок. Если подложка имеет монокристаллическую структуру, то пленка в той или иной степени почти всегда наследует ее. Такое явление называется эпитаксией. Широко распространенная в природе, эпитаксия обрела совершенно новую роль в микротехнологии. При соответствующем подборе эпитаксиальной пары — подложки и материала выращиваемой на ней пленки, а также ориентации подложки и условий роста, удается получить монокристаллическую пленку исключительно высокой степени совершенства. При этом можно варьировать и основной состав эпитаксиальных пар, и содержание различных примесей в них, получая структуры, совершенно не встречающиеся в природе. В предельном случае создаются сверхрешетки — искусственно синтезированные твердые тела, состоящие из многих десятков чередующихся сверхтонких пленок, т. е. содержащие «сверх» естественного порядка атомов в кристаллической решетке заданный порядок с периодом в десятки атомных диаметров и обладающие принципиально отличными от естественных кристаллов свойствами.

В пленках и на границах между ними происходит преобразование сигналов (на этом основано действие подавляющего большинства электронных и вообще твердотельных приборов).

Однако в микротехнологии широко применяются не только монокристаллические пленки: металлические пленки почти всегда имеют поликристаллическую структуру, диэлектрические — вообще аморфны. Эти пленки формируют управляющие электроды транзисторов, систему внутренних связей между ними, защищают приборы от нежелательных воздействий, как кожа живой организм.

Однако для того чтобы пленка могла использоваться в структуре интегральных схем, в ней, как правило, необходимо сформировать определенный рисунок. Простейший путь к этому открывает маскирование.

Маска — пластинка или фольга, в которой по заданному рисунку вытравлены «окна». Если такую маску наложить на подложку, то на последующих технологических этапах вещество будет поступать к подложке только через окна, и мы получим на ее поверхности соответствующий рисунок. Хорошо это получится только в том случае, если атомы вещества летят к подложке по прямым траекториям, как лучи света, что бывает только в вакууме. Но все же полутени и ряд побочных явлений размывают границы рисунка и снижают разрешающую способность технологии. Поэтому накладные маски имеют весьма ограниченное применение. С их помощью создают, например, рисунок проводящих линий, резисторов и конденсаторов на диэлектрических подложках, на которые затем устанавливают кристаллы активных приборов или интегральных схем.

Этот гибрид «сжатого» во много раз печатного монтажа и пленочной микротехнологии так и был назван гибридной технологией. Он служит важным дополнением к микротехнологии, но не входит в основной арсенал ее средств.

Совершенно иной результат достигается, если в качестве маски использовать нанесенную на подложку тонкую пленку, формируя в последней необходимый рисунок с помощью травления.

Пленочная маска (контактная маска) — важнейший инструмент микротехнологии: она играет здесь примерно ту же роль, какую координатный привод играет в металлообработке. Взаимодействие поверхности подложки с поступающими к ней потоками ве-

щества или излучения происходит только в открытых участках (окнах), полутени исключаются, рисунок маски точно воспроизводится во вновь формируемой структуре. Первым средством формирования пленочной маски послужила фотолитография.

Фотолитография, точнее — микрофотолитография, изобретенная в 50-х гг., действительно воспроизводит в микромасштабе принципы тиражирования произведений искусства, развитые более чем веком ранее (но скорее, фотоофорт, чем «классическую» фотолитографию).

Фотолитография, подобно полиграфии, размножает информацию. Однако плотность записи информации при этом повышается в тысячу раз в линейном измерении и в миллион раз на единицу площади, что само по себе принципиально важно. Но самое главное — фотолитография позволяет размножать не только символьную информацию, но и реальные структуры, которые сами способны обрабатывать и размножать информацию.

Основной принцип фотолитографии состоит в том, что на подложку наносят слой фоточувствительного материала — фоторезиста и затем преобразуют его в пленочную маску. Для этого его облучают ультрафиолетовым светом по заданному рисунку. Этот рисунок заранее формируется на специальных фотопластинах высокого разрешения (фотошаблонах), с которых переносится в слой фоторезиста с помощью контактных или проекционных систем. Рисунок может и непосредственно формироваться в слое резиста, например, путем сканирования его лучом лазера. После экспозиции фоторезист подвергают специальной обработке — проявлению и задубливанию. От обычной фотоэмульсии фоторезист отличается тем, что он полностью удаляется при проявлении в отдельных участках (экспонированных или неэкспонированных ультрафиолетом, в зависимости от того, позитивный он или негативный). Так в слое фоторезиста создаются окна, превращающие его в маску. Задубливание просто повышает ее стойкость.

Все же органический фоторезист недостаточно стоек для использования его в качестве маски при подавляющем большинстве технологических операций. Но зато он обладает высокой стойкостью к неорганическим реагентам, растворяющим металлы, полупроводники, диэлектрики (неорганическим травителям). Поэтому чаще всего фоторезист используется в качестве промежуточной маски, через которую травят нижележащую (нанесенную ранее) пленку, например оксида кремния, превращая ее в пленочную маску, пригодную для многих и многих применений. Так фотохимическим путем удается формировать рисунок в нефоточувствительных кристаллах и пленках.

Выше мы неоднократно «между прочим» упоминали операцию травления. Фактически ее роль в микротехнологии исключительно важна, и необходимо рассмотреть этот вопрос специально.

Травление — это физико-химическая разборка кристаллической решетки твердого тела по отдельным атомам. В фотолитографии оно осуществляется жидкими химическими травителями. Но оно может осуществляться также с помощью химически активной газовой фазы, «химической» плазмы, ионных лучей определенных энергий, даже пучками быстрых нейтральных атомов, образующихся в результате нейтрализации предварительно ускоренных ионных лучей. Но каким бы способом оно ни осуществлялось, травление протекает избирательно на открытых, незащищенных маской участках поверхности. Таким образом, травитель как бы гравирует поверхность по заданному рисунку, а травление по рисунку нередко называют микрогравировкой.

Травление играет в планарной технологии, в микротехнологии твердого тела вообще ту же роль, которую в машиностроении и металлообработке играет механический инструмент, и если микролитография — это как бы координатный привод «микротехнологии», то травление — это его резец, фреза, сверло.

Можно подобрать такие травители и условия травления, что скорость раз-

борки решетки твердого тела будет зависеть от кристаллографического направления, т. е. травитель будет действовать анизотропно.

Анизотропное травление выявляет внутренние, кристаллографические плоскости, т. е. плоскости определенной укладки атомов в решетке, таким образом, что их можно использовать в качестве рабочих поверхностей создаваемого устройства. Этим достигается целый ряд принципиально важных результатов: точность естественной «обработки» плоскостей и точность их углов ориентации, практически недостижимая при механической обработке; формируемая наружная геометрия кристаллического устройства автоматически и строго совмещается с внутренней геометрией создаваемых в нем устройств обработки информации. Сам процесс физико-химического формообразования сохраняет принцип интегрально-групповой технологии, а следовательно, высокую производительность и низкую стоимость производства.

Анизотропное травление — эффективное дополнение обычного травления в технологии интегральных схем, в частности, как инструмент для взаимной изоляции входящих в ее состав приборов, а в некоторых случаях и для формирования активных областей самих электронных приборов. Но главное его достоинство в том, что оно позволяет создавать объемные микроконструкции различных датчиков, анализаторов и даже механических устройств, выполненных совместно с электронными схемами в теле одного кристалла кремния, и таким образом проинтегрировать практически весь спектр приборов и устройств приема, обработки и передачи информации.

Располагая рассмотренным выше арсеналом средств, можно создавать уже многие приборы. Например, для ПАВ-приборов, устройств ЦМД, интегральной оптики и даже многих полупроводниковых приборов (некоторых типов полевых транзисторов, например) этих средств в принципе достаточно.

Однако для создания более совершенных приборов и структур необходимо овладеть методами проникновения в решетку ранее сформированного твердого тела. Простейший путь к этому — легирование, а среди методов последнего — диффузия.

Диффузия, диффузионное легирование — проникновение вещества в вещество в результате случайных блужданий отдельных атомов — послужила в прошлом основой многих «революций» в производстве крупных металлических изделий — от напильников до броня́. В полупроводниковой технологии исключительное значение диффузии определяется прежде всего тем, что для качественного изменения электрофизических свойств полупроводника достаточно ввести в него исчезающе малые количества активной примеси — 10^{-3}—10^{-9} %. Но кроме того, примесь обычно достаточно ввести на очень небольшую глубину — порядка одного микрометра и менее. Поэтому чрезвычайно медленный процесс диффузии оказывается не только технологически приемлемым, но и весьма эффективным. В 50-х гг. диффузионное легирование позволило радикально усовершенствовать технологию транзисторов, а вскоре стало одним из «трех китов», на которых возникли микротехнология и микроэлектроника. Первые два названы: фотолитография и диффузия. Третьим стало окисление.

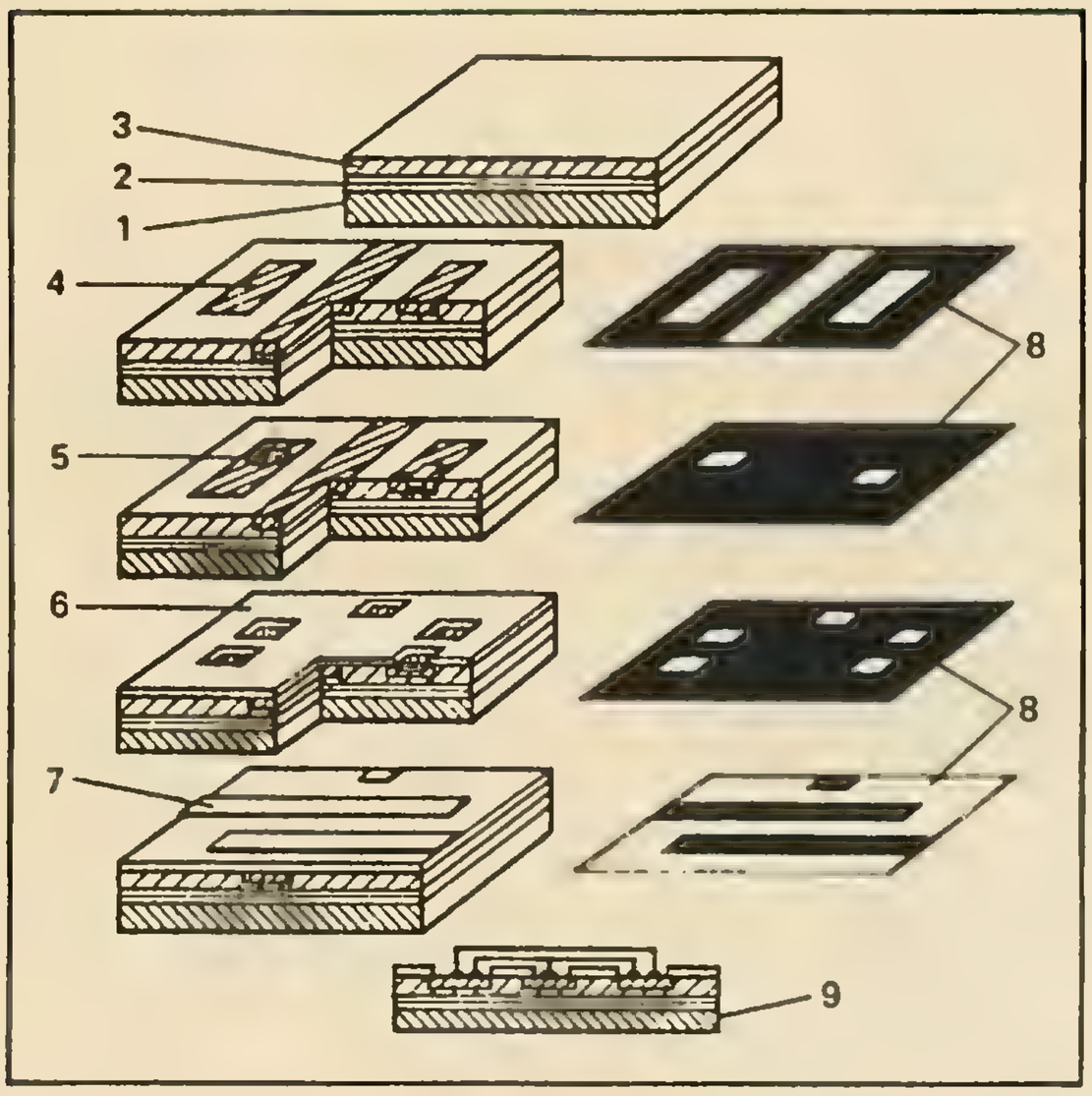
Окисление и окисел. Окисление — всеохватывающее явление в кислородсодержащей атмосфере планеты. Оно ежедневно выводит из строя тысячи тонн металла. Даже осеннее увядание листвы на деревьях — тоже окислительный процесс. Но окисление играет и жизненно важную роль: оно — основа дыхания и биоэнергетики. В микротехнологии кремниевых устройств роль окислительных процессов столь же исключительно важна, потому что оксид кремния, как и сам кремний, обладает совершенно особым сочетанием свойств. Если его легировать определенными примесями, он отлично защищает кремниевые приборы от внешней среды. Оксид кремния — прекрасный диэлектрик, идеально согласованный с кремнием по всему ком-

плексу физико-механических и химических свойств. Наконец, двуокись кремния — лучший оптический материал, особенно для интегральной и волоконной оптики.

В технологии транзисторов окисление сначала играло негативную роль: тонкая пленка оксида на кремниевых подложках, легко образующаяся при высоких температурах даже в присутствии следов кислорода, блокировала диффузию и вызывала производственный брак. Однако вскоре родилась блестящая идея, обратившая беду на пользу: если в окисле вытравить рисунок, то окисел можно использовать как маску и сразу сформировать активные области прибора необходимой формы. Так в союзе окисления и диффузии при поддержке фотолитографии родилась планарная технология.

Планарная технология. В топологии, наиболее абстрактной области современной математики, термин «планарный» обозначает граф (рисунок, содержащий точки — «вершины», и соединяющие их линии — «ребра»), который может быть изображен на плоскости с сохранением всех своих связей, но без пересечения линий. Новая технология была названа планарной потому, что она позволила формировать приборы в теле кристалла с сохранением плоскостности его наружной поверхности. Первоначально этот термин относился к диффузионному легированию с помощью оксидного маскирования. Но, как порою бывает, новый термин впоследствии обрел несравнимо более глубокий смысл, чем это предполагалось. Фактически родилась технология, позволяющая разложить пространственную структуру формируемого устройства на ряд плоских образов и последовательно формировать их, шаг за шагом выполняя обратные преобразования плоских образов в объемную структуру реального изделия. Поскольку каждый этап такой технологии предельно упрощается, производительность и точность его возрастают в тысячи раз, а в результате растет и доступная сложность изделий, в то время как цена их остается неизменной.

Нечто подобное произошло в ткацком деле на рубеже XVIII—XIX вв., когда для создания тканей со сложным рисунком французский изобретатель Ж. Жаккард разработал станок, программируемый перфокартами. Однако революция, произведенная планаром, неизмеримо глубже. За сравнительно короткий промежуток времени для кристаллических устройств был создан арсенал технологических средств, равномощный всей технологии механической обработки, которая формировалась тысячелетиями. И притом продукция планара создает информационно-управляющий базис, преобразующий всю техносферу в целом. Планар — фундамент всей современной технологии элементов вычислительной техники и систем управления. От транзистора до однокристальных ЭВМ, интегральных схем памяти на миллионы бит, интегральных однокристальных датчиков, измерительных и аналитических приборов с встроенными системами обработки данных — таков спектр современной продукции планара на кремнии. Но ему оказались подвластными не только кремний, а практически любые полупроводники, сегнетоэлектрики, ферромагнетики, сверхпроводники... При этом принцип планара оказался универсальным и в другом отношении: сотни, если не тысячи физических и физико-химических явлений «послушно работают» в его рамках — от процессов классической металлургии до взаимодействий элементарных частиц с твердым телом. Но все рассмотренное — лишь основной арсенал средств планарной технологии. Позже мы увидим, что она гибко приемлет любые физико-химические процессы формирования структуры и форм твердого тела. Если продолжить аналогию с традиционной технологией формообразования, то на каких бы конкретных принципах ни были основаны отдельные процессы, микролитография выполняет функцию координатного привода, травление — механического инструмента, легирование и другие способы воздействия на ранее сформированную структуру сохраняют в принципе свои традиционные функции, а последова-



Этапы формирования структуры интегральной схемы: 1 — исходная пластина кристалла; 2—5 — области, различающиеся видом и концентрацией легирующих примесей; 6 — пленка диэлектрика; 7 — пленочные проводники; 8 — шаблоны; 9 — сформированная структура.

тельное нанесение различных пленок — функцию сборки изделия.

Быть может, единственное, что вносит принципиальные ограничения возможностей планара, — это необходимость совмещения.

Совмещения. Преобразование набора плоских рисунков в объемную структуру изделия достигается поэтапными совмещениями каждого последующего рисунка с ранее сформированной структурой.

Принцип послойных совмещений применяется не только в планарной технологии. На нем, например, основана цветная полиграфия. Совмещения в планарной технологии предъявляют предельно жесткие требования к измерительной и технологической аппаратуре, к устройствам управления. Создаваемая для этого техника находит применение в самых различных областях.

Допустимая погрешность совмещений много меньше минимального размера деталей создаваемой структуры. Но как ни мала эта погрешность, она суммируется с каждым очередным совмещением, а число последних тем больше, чем сложнее создаваемое устройство. В конце 80-х гг. максимальное число совмещений планара превышает 15 и продолжает расти. Но по указанной причине оно не может расти неограниченно. Совмещения — самое узкое место планарной технологии. Именно этот аспект определяет ее фундаментальные границы.

Самосовмещение, селективность. Естественно стремление найти пути к частичному, а по возможности полному устранению совмещений, точнее — искусственных совмещений в планарной технологии. Поскольку совмещение — один из основных ее атрибутов, приходится пересматривать самые основы технологии. А основана она на избирательности (селективности) физико-химических процессов по отношению к специально созданным неоднородностям поверхности подложки. Обычно эти неоднородности создаются с помощью пленочных масок, но в принципе любая неоднородность поверхностных и приповерхностных слоев подложки может привести к избирательному протеканию на отдельных ее участках тех или иных физико-химических явлений. Роль таких неоднородностей, локализующих процессы легирования, роста пленок, травления, могут играть элементы синтезируемого твердотельного устройства, созданные на более ранних технологических этапах. Тогда будет достигнуто самосовмещение этих предыдущих этапов с последующим, и по крайней мере одним искусственным совмещением (и одним шаблоном) станет меньше.

Первый такой процесс был разработан в начале 70-х гг. на основе двойной системы маскирования — оксидного (обычного) и нитридного. Нитрид кремния, как и его оксид, прекрасный диэлектрический и маскирующий материал, и, что самое важное, он маскирует процесс окисления, причем удается подобрать травители, селективно растворяющие либо нитрид, либо оксид кремния. Основанная на этом технология, получившая название **изопланарной,** позволила не только повысить точность совмещения отдельных элементов транзисторных структур, но и сформировать изолирующий диэлектрик,

погруженный в кристалл. В результате улучшились практически все характеристики приборов и интегральных схем, была значительно повышена степень интеграции. Затем последовало множество других эффектов самосовмещения, которые позволили создавать отдельные элементы транзисторных структур с размерами меньше проектной нормы.

В тот же период, в начале 70-х гг., автором брошюры был поставлен вопрос: возможно ли в принципе полностью устранить искусственные совмещения в планарном процессе [1]. Исследование этой проблемы привело к любопытным результатам [2]. С одной стороны, удалось составить нечто вроде периодической системы селективных эффектов, композиции которых давали различные эффекты самосовмещения (многие из них были, действительно, позже описаны). С другой, оказалось, что основанная на кристаллах технология микроструктур в принципе неотделима от искусственных совмещений, и это налагает довольно жесткие ограничения на достижимый уровень внутренней сложности формируемых на ее основе устройств.

Однако эти ограничения лежат далеко за пределами достижений технологии не только начала 70-х, но и конца 80-х гг. А вдали от пределов микротехнология развивается стремительной и твердой поступью.

Четверть века пропорциональной миниатюризации

Само возникновение интегрально-групповой технологии и микроэлектроники привело к тому, что элементами вычислительной машины стали не физические приборы, а логические вентили и ячейки памяти. Физико-химическое в своей основе производство захватило нижний ярус синтеза вычислительных и управляющих машин и систем, изменилась инженерная психология. Разработчик машин перестал интересоваться физикой приборов и все больше и больше уходил от схемотехники. Он без сожаления и даже с нетерпением смотрел, как технология оттесняет его снизу, устремляясь от элементов ввысь, к узлам, блокам, подсистемам. И в основе всего была миниатюризация. Началась настоящая битва за миниатюризацию — уменьшение геометрических размеров элементов, что обеспечивало и совершенствование их характеристик, и рост их числа в интегральной схеме — степень интеграции. И вновь повседневные усилия тысяч технологов и разработчиков незаметно готовили почву для новых научно-технологических революций.

Геометрический масштаб — важнейшая характеристика технологий, определяющая их цели и стиль. Но необходимо различать размеры создаваемых объектов (обозначим их символом L) и размеры их мельчайших деталей, так называемую проектную норму, разрешающую силу технологии (обозначим ее символом l).

В ранний период развития новой технологии (1960-е гг.) принципы конструирования машин и приборов оставались еще неизменными. Проектная норма едва достигала отметки $l = 10$ мкм, и принципиальные изменения в технологии еще не приводили к существенным физическим особенностям в работе приборов. По существу, последние проектировались так же, как и любые машины и устройства. Уменьшение их размеров, сколь трудно оно ни достигалось технологически, подчинялось удивительно простым закономерностям.

Все размеры в плоскости подложки, толщина пленок, глубина переходов сокращались пропорционально l, а площадь, занимаемая каждым прибором, пропорционально l^2. Соответственно снижались количество энергии и время, затрачиваемые на каждый бит перерабатываемой информации. Плотность упаковки транзисторов (их число на единицу площади кристалла) росла еще быстрее благодаря совершенствованию геометрии прибора и схемных решений. А степень интеграции прогрессировала еще стремительнее, поскольку совершенствование всех составляющих технологии — выращивание исходных монокристаллов, их последующая механическая обработка

и подготовка поверхности, да и самой планарной технологии — обеспечивало неуклонный рост диаметра и степени совершенства подложек, снижение вероятности появления негодных транзисторов, а вследствие всего этого — увеличение максимально экономичной площади интегральной схемы. Итогом явился почти мистический закон роста степени интеграции — ежегодное удвоение, 2^{τ} (τ — «возраст» микроэлектроники), который стабильно сохранялся в течение двух десятилетий.

Разве что мощность приборов и сила тока в линиях связи не успевали за миниатюризацией, поскольку от них прямо зависит быстродействие приборов. В результате удельная мощность (на единицу площади схемы) и плотность тока в линиях связи непрерывно возрастали. Но до поры до времени это не очень смущало.

В 70-х гг., когда технология начала овладевать микрометровым диапазоном ($l=5$—7 мкм) и превращаться действительно в микротехнологию, стало возможным размещать крупные функциональные блоки ЭВМ, вплоть до ее центрального ядра — процессора, в пределах одного кристалла. И возникло микропроцессорное направление развития вычислительной техники.

Легко подсчитать, что если микроэлектроника возникла как область перспективных разработок в 1958—1959 гг. и как промышленность в 1960—1961 гг. (начало серийного выпуска первых интегральных схем), то при законе роста интеграции 2^{τ} к 1971—1972 гг. в разработках, а к 1973—1974 — в серии ей становится доступным создание интегральных схем, содержащих 2000—4000 транзисторов. Но именно столько и нужно для создания простейших процессоров универсального назначения. И именно в этот момент истории микроэлектроники и началась микропроцессорная революция. Она продолжается и сейчас и требует радикального пересмотра всех аспектов техники обработки информации, да и не только ее.

Прежде всего микропроцессор — это машина и элемент в едином лице. Действительно, логический кристалл, воспринимающий язык программирования, вобрал в себя базисные принципы построения машин недавнего прошлого. Если он, как и интегральные машины прошлых поколений, используется в качестве элемента, возникает технический объект совершенно небывалого типа: машина, состоящая из машин. Но его можно рассматривать и как почти готовый логический автомат, который может быть встроен в качестве миниатюрного «электронного мозга» в любой другой технический объект, придавая ему также совершенно небывалые свойства. Наконец, микропроцессор может послужить основой машины, предназначенной для индивидуального пользования, т. е. для персональной ЭВМ.

Укрупняя известное деление машин на поколения, можно выделить три основные фазы развития современных средств обработки информации:

1) домикроэлектронную, когда каждая ЭВМ была уникальна;

2) промежуточную, когда наметилось множество путей развития вычислительной техники, от многопроцессорных супер-ЭВМ до широко доступных минимашин;

3) современную, когда наряду со структурным и аппаратным совершенствованием машин всех ранее возникших классов сформировался мощный класс персональных машин, ориентированных на удовлетворение повседневных нужд человека в информации, и класс встраиваемых микропроцессорных устройств, «интеллектуально» преобразующих самые различные технические устройства — от механических инструментов и измерительных приборов до роботов и телевизионных камер.

Несмотря на стремительные темпы повышения сложности элементов и ЭВМ, стоимость и интегральных схем, и машин (соответствующего класса) остается практически неизменной во времени. Групповая интегральная технология, непрерывно совершенствуясь, позволяет усложнять кристалл, почти не увеличивая трудовых затрат на его изготовление, равно как и затрат энергии и материалов.

К началу 80-х гг. производительность персональных ЭВМ достигла сотен тысяч операций в секунду, супер-ЭВМ — сотен миллионов операций в секунду, мировой парк вычислительной техники превысил 100 млн. машин. А потенциал развития микроэлектроники и микротехнологии еще далеко не был исчерпан: оставались многие порядки по всем основным количественным показателям информационных машин и систем на микроэлектронной элементной базе. Однако для реализации этого потенциала требовались уже принципиально новые решения на всех фронтах информационной технологии, поскольку животворная сила старых принципов проектирования и синтеза информационных систем начала иссякать. Если вновь сопоставить развивающуюся технологию с неким сверхорганизмом, то окажется, что наиболее чувствительные рецепторы последнего начинают ощущать пределы движения буквально во всех направлениях. Технологически все труднее уменьшать размеры деталей транзисторов, а по мере того как это все же удается делать, лавинообразно нарастают сложные физические явления в работающих приборах. Быстродействие приборов приближается к верхнему, а энергопотребление — к нижнему пределу, на совершенно ином уровне проявляются проблемы отвода мощности и проблемы внутренних связей в машине в целом. Проектирование элементов становится столь сложным, что продолжать его в рамках старых концепций и старыми средствами оказывается невозможным, а проектирование ЭВМ требует принципиально нового понимания основных функций и архитектуры машин. Словом, нужно строить все здание заново, начиная с фундамента — технологического инструментария и подхода к технологическому прогрессу, поскольку старый принцип — принцип пропорциональной миниатюризации — более не оправдывается.

Рубежи, перевалы, горизонты

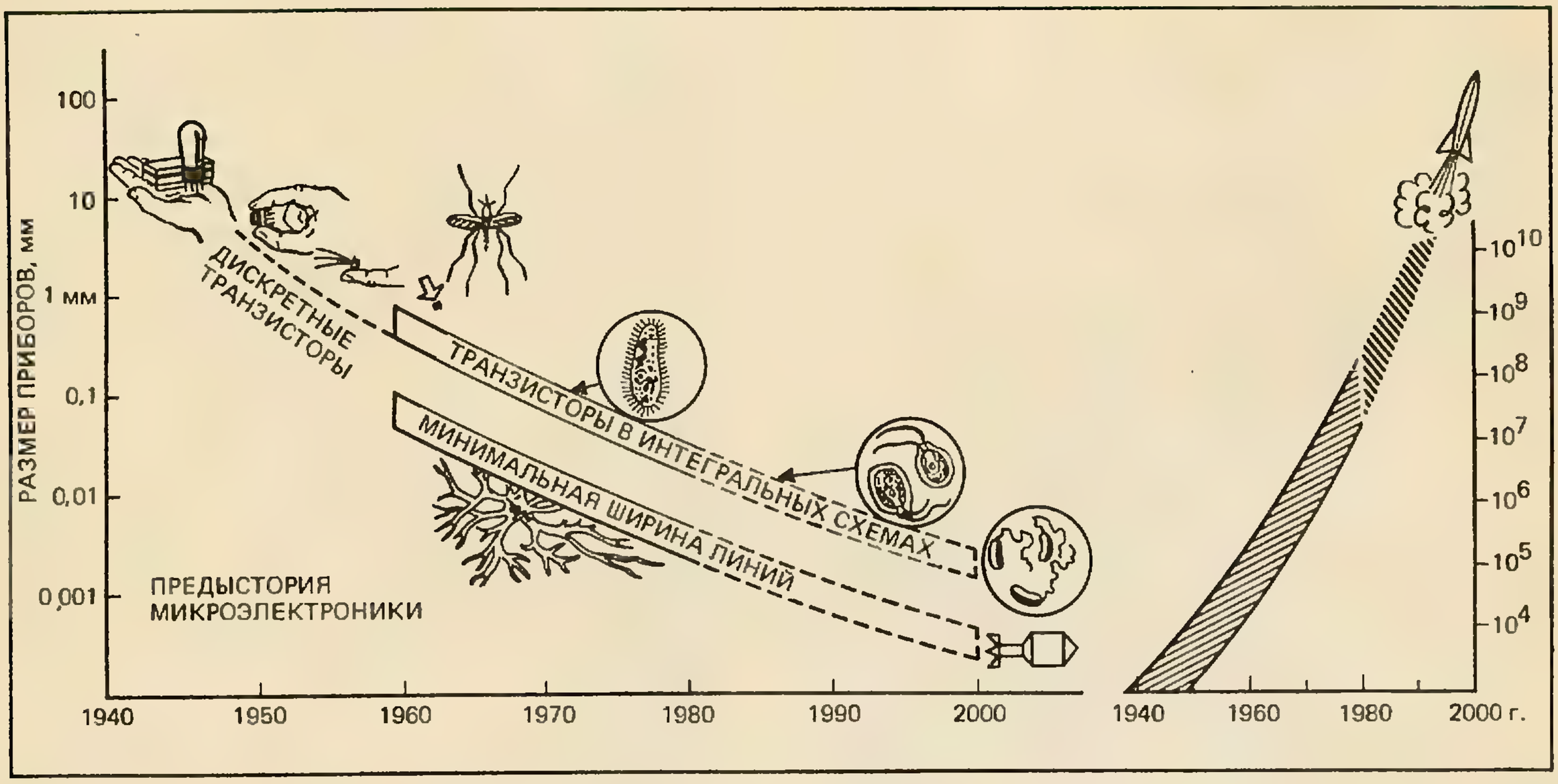
Развитие миниатюризации напоминает эстафетный бег с барьерами, но бег весьма странный. После каждого очередного барьера совершенно изменяется характер местности, а уже в полете над барьером эстафету принимает новый бегун, который не только способом бега, но даже обликом своим сильно отличается от предыдущего. Участник первого этапа отличается от участника третьего, как дельфин от орла.

Через несколько барьеров картина этих стремительных соревнований преображается так, что кажется немыслимым, каким образом столь разные существа, передвигающиеся в столь различных стихиях, могут передавать друг другу эстафету.

Барьеры в мире микротехнологии выражаются в виде проектных норм, и мы воспользуемся этим представлением, чтобы сравнить информационную технику прошлого с настоящей и с той, которую следует ожидать в обозримом будущем.

1. «Проектная норма», т. е. минимальный размер деталей, $l \approx 1$ см. Камешки древнего абака, «косточки» счетов, шестеренки арифмометров. Технология проделала огромный путь, изменились и принципы работы устройств: у счетов более строгая разрядная система, чем у абака, у арифмометров осуществляется передача движения от элемента к элементу и автоматически переносятся десятки в старший разряд. Но «бегуны» остаются те же: твердые предметы, отображающие числа, да и характер «бега» не меняется; механическое перемещение тех же предметов. Но на преодоление даже этих этапов ушли тысячелетия.

2. Проектная норма $l \approx 1$ мм. Разностная и аналитическая машина Ч. Бэббиджа, релейные и ламповые устройства, первые ЭВМ — весь XIX и первая половина XX в. Механическая технология и механические принципы действия элементов дошли до своих пределов. В аналитической машине еще царствовала механика, в релейных системах за ней сохранились только исполнительные функции, в ламповых они оставались за ней лишь на периферии. Эстафету приняли электронные импульсы — группы элемен



Так с годами менялись размеры элементов ЭВМ и минимальная ширина линий рисунка интегральных схем. Чем меньше размеры элементов, тем выше производительность машин.

тарных зарядов. Механическая технология в значительной мере уступила свое место металлургическим операциям, которые выполняли ранее подготовительные функции. Когда движение зарядов скрылось во внутреннем пространстве твердого тела, лампа уступила место транзистору, механическая технология полностью уступила центральную роль физико-химической.

3. Проектная норма $l \approx 0{,}1$ мм (100 мкм). Транзисторы и транзисторные машины. Электроны окончательно приняли эстафету. На протяжении одного поколения средств вычислительной техники (10 лет) проектные нормы продвинулись на порядок — ранее технологии требовались на это целые века. Однако дальнейшее ускорение в таком тепме невозможно. Теперь на каждое очередное поколение, на каждый технологический этап будет уходить по 10 лет. Но зато преобразования будут становиться все более глубокими.

4. Проектная норма $l = 100—10$ мкм. Интегральные схемы 1-го поколения и ЭВМ — 3-го. Зарядовые пакеты почти соприкасаются. Если бы мы могли их увидеть, то заметили бы, что они иногда подталкивают друг друга, и вся машина напоминает уже не счеты, а необыкновенно усложненный арифмометр.

5. Проектная норма $l = 10—1$ мкм. Это, собственно, не один, а два этапа: от 10 до 3 и от 3 до 1 мкм. «Бегун» таких размеров уже начинает различать отдельные атомы или электроны, физические пределы становятся ощутимыми. Линейность, та линейность, к которой мы так привыкли, на которой основано и проектирование одежды, и линейность перспективы — эта линейность нарушается. Интервал от 3 до 1 мкм требует для своего преодоления не меньше времени и сил, чем, скажем, интервал от 100 до 10 мкм. Изменяется технология — от физико-химических основ до принципов проектирования, преображается и ее продукция. Но все же при проектировании технологических процессов и изделий еще служат надежной опорой логика, здравый смысл, физические модели. А как проектировать систему из таких единиц? Этого мы, строго говоря, не знаем. И может быть, никогда не узнаем, поскольку проектирование в привычном для нас смысле становится невозможным. Как ни примитивны пока еще детища технической цивилизации, они уже достаточно сложны для того, чтобы изменить систему руководящих образов языка. Ведь научно-технический язык метафоричен. И если физики говорят об ароматных, очарованных

или прелестных частицах, то, хотя и не предполагая сходства частицы со светской красавицей, они используют как опору бытовые представления о многообразии мира.

Для наиболее сложных систем, созданных на основе 1-микронной технологии, уже приходится начинать эксплуатацию такого привычного для нас слова, как «воспитание». Система из тысяч процессоров проявляет некоторые способности непредсказуемой, в явном виде не заложенной в ее программах обучаемости. В Стэнфордском университете разработана программа ЭВРИСКО, способная к самосовершенствованию. В величественных программах создания искусственного интеллекта (пятилетняя программа с объемом 600 млн. долл. в США, десятилетняя на 850 млн. в Японии, пятилетняя на 100 млн. в СССР) предусматриваются такие возможности программно-аппаратных средств вычислительной техники.

Но прежде чем продолжать обозрение этой странной эстафеты, рассмотрим кратко основные проблемы, которые встают перед технологией на микронном рубеже.

Лавина проблем на микронном рубеже

Проектная норма — это прежде всего характеристика микролитографии. Поэтому первые проблемы, которые обсуждаются в связи с рубежами микротехнологии, — это ограничения прежних поколений литографической техники. Фотолитография основана на фотохимических реакциях, и наиболее принципиальное из ограничений ее разрешающей способности связано с длиной волны экспонирующего излучения λ.

Интерференция, дифракция и связанные с ними нелинейные эффекты, искажающие экспонируемый на подложке рисунок, становятся заметными уже при проектной норме $l=2\lambda$. Формальный предел разрешающей способности фотолитографии $l>1{,}22\lambda$, т. е, при длине волны экспонирующего излучения 0,3—0,5 мкм можно получать рисунок с линиями 0,4—0,6 мкм. Фактически для реализации этой возможности необходимо применять очень сложную методику: контактную литографию с иммерсионными маслами, что совершенно нетехнологично, экспозицию в когерентном излучении при специальном волновом согласовании экспонирующих лучей и оптической системы и т. п. В принципе можно получить разрешение, даже превышающее указанный предел (если применять фоторезист с ярко выраженным порогом чувствительности и излучение, плотность которого превышает этот порог только в центре луча). Абсолютный предел фотолитографической техники $l=0{,}15$—$0{,}20$ мкм, однако трудности имеют тенденцию катастрофически нарастать вблизи абсолютных пределов, аппаратура и методика соответственно сильно усложняются, и технология становится экономически нерентабельной еще до достижения этих пределов.

Первый выход из создавшегося положения — заменить ультрафиолет корпускулярными излучениями: электронами, протонами, более тяжелыми ионами. Волновые ограничения практически снимаются полностью (длина волны даже электрона, не говоря о более тяжелых частицах, пренебрежимо мала для рассматриваемых целей). Правда, возникают совершенно новые проблемы. Электроны, пройдя слой резиста, рассеиваются подложкой назад и экспонируют электронорезист в смежных областях, так что контраст между близко расположенными элементами рисунка теряется (эффект близости). Для борьбы с этим эффектом вырабатывается своя рецептура, например, применение специальных многослойных резистов (причем чувствительность и другие свойства каждого из слоев подбираются специально). В случае ионно-лучевой экспозиции обратное рассеяние и эффект близости ослабляются на порядок, но вскрываются другие проблемы.

Фотошаблон сравнительно дорого разработать и изготовить, но после того как это сделано, его легко копировать, размножать и, самое главное, он позво-

ляет осуществлять высокопроизводительную экспозицию слоя фоторезиста на подложке: секунды или десятки секунд на экспозицию почти независимо от размера подложки и сложности рисунка. Именно в этом один из главных секретов экономичности микротехнологии. Шаблон для электронных лучей — изделие много более сложное, чем любая интегральная схема, поскольку прозрачные для электронов области шаблона должны быть тоньше микрометра, и приходится выполнять целую ажурную конструкцию из островков сравнительно толстого металла, расположенных на несущей тончайшей мембране из полупроводника или органической пленки. Помимо дороговизны, электроношаблон очень неудобен в работе, а для его экспозиции необходимы специальные установки, создание которых — самостоятельная проблема, и здесь пока не найдено даже в принципе удовлетворительного решения. В случае ионной экспозиции эта проблема еще более сложна.

Остается один путь — сканировать подложку лучом: пробегая ее по команде ЭВМ, луч формирует изображение как на экране телевизора, но с линейным разрешением в тысячи (а по площади — в миллионы) раз более высоким. По разрешающей способности это лучшее из известных решений: уже существующие промышленные установки надежно работают при l=0,5—0,8 мкм, лабораторные — l=0,1—0,2 мкм, а в уникальных экспериментах нарисованы отдельные линии шириной 2 нм (не более 10 диаметров атома!). Скажем, в схеме 2005 г. (ближние задачи рассматривать нет смысла, с ними может так или иначе справиться фотолитография) необходимо на подложке диаметром 200 мм нарисовать последовательно 30 картин (сейчас число последовательно совмещаемых рисунков может быть более 16) с разрешением 0,1 мкм. Для этого в общей сложности придется просканировать путь длиной 10 000 км на каждую подложку, успевая на лету переключать луч на каждом участке траектории длиной 0,1 мкм и выделять на этом участке необходимую для экспозиции резиста дозу электронного потока. Для создания подобных систем необходимо решить целый комплекс проблем: высокая плотность электронов в остро сфокусированном пучке, сверхбыстродействующая система сканирования и управления, высокочувствительные электронорезисты — это лишь частичный их перечень. И эти проблемы по меньшей мере не упрощаются при переходе от электронов к ионам. Но ионы открывают иные возможности.

Ионный луч в зависимости от энергии ионов может выбивать атомы из решетки кристалла (ионное травление) либо проникать в нее на ту или иную глубину. В последнем случае, подбирая соответствующий тип ионов, можно легировать кристалл (ионное легирование, или ионная имплантация), формировать на нем пленку диэлектрика (в результате химического взаимодействия ионов кислорода или азота с кремнием образуются прекрасные диэлектрики — оксид кремния, нитрид кремния, оксинитрид кремния), частично разрушать решетку, с тем чтобы затем провести ускоренную локальную диффузию легирующих примесей в соответствующих участках подложки (ионно-стимулированная диффузия). Дополнительные возможности открываются при самых низких энергиях ионов, примерно до 10 эВ (в то время как названные выше процессы осуществляются в диапазонах энергии 10^3—10^6 эВ). Ионы таких энергий стимулируют химические реакции на поверхности, что важно для локального химического травления (точнее, ионно-химического), для улучшения условий роста и повышения степени совершенства эпитаксиальных пленок. Наконец, можно просто проводить осаждение вещества на подложку из ионного пучка (разумеется, ионы при этом нейтрализуются). Все эти процессы привлекательны тем, что ионными пучками можно управлять, фокусируя их, направляя на нужные микрообласти подложки, регулируя соотношение между различными ионами в пучке и их энергию. Таким образом, можно

осуществить практически все необходимые процессы микротехнологии в одной камере, управляемой ЭВМ, обходясь вообще без шаблонов и других промежуточных инструментов и процедур.

Эта заманчивая возможность привлекала исследователей уже на заре микроэлектроники. Увы, она была и в значительной степени остается только принципиальной возможностью: производительность ионно-лучевых процессов в сканирующем режиме еще ниже, чем электронно-лучевых, а кристалл после ионной обработки нуждается в восстановлении структурного совершенства. Конечно, ионное легирование, ионное травление, селективное ионно-химическое травление применяются широко, но не в режиме сканирования. Так что от шаблонов пока уйти не удается. Правда, оснований для абсолютного скептицизма здесь все-таки нет: при достаточно малой толщине активных слоев интегральных схем (а тенденция, как уже отмечалось, направлена в эту сторону) сочетание необходимых доз и энергии ионов может оказаться гораздо более благоприятным. Тем более что по мере продвижения на микронный рубеж и за него не только нарастают проблемы, но и открываются принципиально новые возможности. Некоторые из них раскрылись немногим более 10 лет назад автору и группе исследователей [3].

Уже довольно давно и многими замечалось, что электронный и ионный лучи стимулируют полимеризацию паров органических соединений в вакуумных камерах. Роль таких соединений могут играть пары масел вакуумных насосов, обычно использовавшихся в ранних поколениях технологических и контрольно-измерительных вакуумных установок. В результате на поверхности обрабатываемых или исследуемых подложек образуются органические пленки, изменяющие их свойства, блокирующие фотолитографическое травление и т. п. Мы обратили внимание, что эти пленки химически устойчивы и беспористы уже при исчезающе малых толщинах. В том случае, который мы первоначально изучали, энергия ионного потока составляла от 50 000 до 150 000 эВ, в температурной шкале эквивалентно $(6—1800)\times 10^6$ C°. Однако в действительности каждый ион рассеивает свою энергию за очень малое время — через 10^{-11} — 10^{-12} с после столкновения с подложкой, вызывая в ней те или иные структурные изменения. В конечном счете эта энергия переходит в тепло, но отводится на массивный держатель, а собственная температура подложки повышается незначительно. Было удивительно, как исчезающе тонкая пленка, формируемая воздействием ионного потока, выдерживает его бомбардировку, сохраняя свою сплошность и химическую стабильность. Пришлось разработать специальную методику, чтобы исследовать ее свойства. Оказалось, что пленка начинает оказывать надежное защитное действие уже при толщине около 1 нм, сдвигая момент начала травления металла, скрытого под ее покровом. Сначала этот эффект составлял примерно 1% от наблюдаемой скорости травления, при более высоких дозах стремительно нарастал в десятки и сотни раз, а после достижения некоторой критической дозы травление металла прекращалось. Причем нужную дозу можно было набрать за несколько приемов облучения — подложка «запоминала» свою историю. Но пленка переставала расти, достигнув толщины около 10 нм. В конце концов раскрылся тонкий и гармоничный механизм самостабилизированного роста кремнийуглеродистой пленки, механизм, который хотелось бы наградить эпитетами «смелый» и «остроумный», если бы он был придуман людьми. Ионы аргона, разгоняясь до больших скоростей, сталкиваются с кремнийорганическими молекулами, в свою очередь ионизируют их, образуя заряженные радикалы. Последние адсорбируются на подложке, принимая от нее недостающие электроны и нейтрализуясь. Когда адсорбированные радикалы образуют сплошной мономолекулярный слой, тот же луч ионов аргона полимеризует его, прошивая, словно на ткацком станке, и образуя

Развитие технологий — важнейший элемент общего развития человека и человечества. Фрагменты этого развития приблизительно привязаны к шкале времени (от 1940 г. в прошлое шкала логарифмическая). Снизу и сверху показаны основные материалы по времени их освоения промышленностью.

диэлектрическую пленку. Но следующим радикалам теперь приходится вытягивать заряд из подложки через диэлектрик. Пока он тонкий, электроны туннелируют сквозь него легко, и пленка продолжает расти. Если она случайно где-то оказалась тоньше, рост ускоряется, толще — замедляется. Когда же ее общая толщина достигает критической величины, прекращается туннелирование, а с ним — адсорбция радикалов и рост пленки. Так получается, что сверхслабые туннельные токи, вызываемые разностью потенциалов в 1 В, управляют синтезом, стимулируемым ускоряющими напряжениями в 100 000 В. Поистине природа изобретательнее самых остроумных изобретателей.

К этому рассказу, приведенному лишь для иллюстрации неожиданных явлений, которые раскрываются в субмикронном мире, стоит добавить, что при более низких ускоряющих напряжениях эффект самостабилизации исчезает. Но зато открывается возможность выращивать чрезвычайно стойкие в механическом и химическом отношении «алмазоподобные» пленки заданной толщины. Можно не сомневаться, что по мере продвижения в «наномир» исследователи будут вооружаться все более мощным арсеналом полезных физико-химических явлений. Однако мы несколько забежали вперед и должны вернуться к актуальным проблемам преодоления «микронного рубежа». Отдельные эффекты, действующие в нанодиапазоне, могут быть полезными и сейчас. Но не они, а согласованная система физико-химических и аппаратных средств «делают погоду» на каждом этапе развития технологии. В области микролитографии такая система сегодня должна в основном опираться на технику экспонирования подложки через шаблоны. Электронная и ионная литография позволяет прекрасно синтезировать сами шаблоны и в отдельных наиболее

ответственных случаях — рисунок непосредственно на подложке. Но при массовом выпуске схем рисунок необходимо переносить с шаблона на подложку с помощью электромагнитного излучения. И если с помощью ультрафиолета это сделать не удается, необходимо обратиться к рентгеновскому диапазону длин волн, который начинается примерно с 1 нм и надежно обеспечивает необходимую разрешающую способность в микродиапазоне.

Изготовить рентгеношаблон немногим проще электроношаблона, но создать камеру рентгеновской экспозиции неизмеримо легче, к тому же этот процесс не требует вакуума и много более производителен, чем экспозиция через электроношаблон. Пожалуй, здесь существуют только две серьезные проблемы: плотность и расходимость рентгеновского излучения. Предельное разрешение, которое в принципе достижимо в рентгеновском диапазоне, можно было бы обеспечить только при почти нулевой расходимости, либо многократно диафрагмируя излучение, либо с помощью многокристальных рентгенодифракционных систем. В обоих этих случаях катастрофически падает интенсивность излучения (идеально сработал бы рентгеновский лазер, но сегодня совершенно нереально обсуждать такую возможность в технологических приложениях).

И вот перед технологией открывается привлекательная возможность использовать достижения физики элементарных частиц и ее экспериментальную технику. Электроны, движущиеся с «релятивистскими» скоростями (близкими к скорости света), когда существенны эффекты, предсказываемые теорией относительности, испускают электромагнитное излучение рентгеновского диапазона при торможении и искривлении траектории полета. Это излучение, наблюдаемое в синхротронах и потому так и называемое синхротронным, можно регулировать по длине волны, интенсивности, расходимости. Правда, строительство необходимых для этого накопительных колец электронов — дело сложное и дорогое. Однако некоторые крупные фирмы уже приступили к из созданию.

Сам факт использования принципов и технических средств физики элементарных частиц весьма характерен для микротехнологии в окрестности $l=1$ мкм. Если «классическая» микротехнология опиралась на фотохимию, диффузию и гетерогенные физико-химические процессы в системах кристалл — газ, кристалл — жидкость, то новая технология переходит на платформу электронохимии и рентгенохимии, ионного легирования, физико-химических процессов при взаимодействии твердого тела с молекулярными, атомными и ионными потоками и плазмой. Так технология воспринимает потенциал средств, накопленный наиболее современной областью технической и экспериментальной физики. Причин для этого несколько. Прежде всего диффузия и все процессы, контролируемые ею (а к ним принадлежат процессы в жидких и газообразных средах), распространяются размытыми округлыми фронтами, краевые эффекты размывают исходный фотолитографический рисунок на величину, эквивалентную глубине обработки подложки. Таким образом, наряду с длиной волны экспонирующего излучения и другими ограничениями фотолитографии они снижают разрешающую способность всех технологий. Кроме того, это инерционные процессы, которыми трудно управлять, что снижает разрешающую способность технологии в третьем измерении (если считать, что первые два задаются фотолитографией) по глубине проникновения фронтов легирования и толщине пленок. Для проведения диффузии и обычных химических процессов обычно требуется высокая температура, при которой размываются границы тонкой и сложной ранее сформированной интегральной схемы. Наконец, вообще вакуумные процессы экспериментальной физики удобнее в управлении (они, как правило, легко поддаются полной автоматизации на базе ЭВМ), компактнее, гигиеничнее.

Однако у всех процессов высоких

энергий (по сравнению с химическим диапазоном энергий 0,1—10 эВ, ионно-плазменная и ионно-лучевая техника с ее энергиями 100—1 000 000 эВ ближе к ядерным процессам) имеются два серьезных недостатка: быстрые частицы разрушают кристаллическую структуру подложки; процесс не так избирателен, как при обычных реакциях, что нарушает основной принцип микротехнологии — принцип селективности.

Конструктивные решения открываются на пересечении «химической» и «физической» технологий, как бы раскрывая их будущий симбиоз. Например, упомянутое ионно-химическое травление обладает удивительными свойствами. Ионы сравнительно низких энергий активируют гетерогенную реакцию кристалла с адсорбированным слоем мономолекулярной толщины. Сама по себе реакция селективна и протекает только на чистых (не защищенных маской) участках поверхности кристалла. Когда же травление начинается, то ионный поток, падающий на поверхность строго перпендикулярно, проникает в образующиеся углубления без теневых эффектов и формирует ровные вертикальные стенки рельефного рисунка.

Как нетрудно догадаться, начавшийся переход на новую технологическую базу требует радикальной смены не только всего аппаратно-технического воплощения технологии, но и самих принципов ее организации. Практически полностью изменяется и подход к управлению и автоматизации процессов, их проектированию и моделированию. Изменяется и характер труда технолога.

Достаточно привести следующий пример: для проектирования кристаллов первого 4-разрядного микропроцессора потребовалось около одного человеко-года (начало 70-х гг.), а для проектирования первого 32-разрядного микропроцессора потребовалось более 100 человеко-лет (на исходе 70-х). При таком темпе роста трудоемкости проектирование одного кристалла к концу века потребовало бы усилий всех проектировщиков мира в течение нескольких лет. Иными словами, трудности проектирования нарастали с такой катастрофической скоростью, что прогресс микроэлектроники и микротехнологии становился проблематичным. Не случайно даже у таких бывалых первопроходцев, как основатель двух знаменитых американских фирм «Fairchild» и «Intel» Г. Мур, возник глубокий скепсис относительно целесообразности дальнейшего развития технологии.

Но в то время как нарастали эти проблемы и порожденный ими скепсис, соотечественники Мура — Лин Конвей (одно из ярких женских имен, связанных с микротехнологией, с другими мы еще встретимся при обсуждении нанотехнологии) и Майкл Мид — разработали принципиально новый подход к проектированию интегральных схем, т. н. СТРУКТУРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ, которое ведется не снизу вверх, от элементов к устройству, а сверху вниз, от общей схемы последнего к элементам.

Новый подход отличается от старого, как скоростной спуск на лыжах отличается от карабканья с лыжами на плечах вверх по склону. Правда, если нет подъемника, то карабкаться все равно придется. Теперь в структурном проектировании роль подъемника играют системы автоматизации проектирования (САПР), базирующиеся на высокопроизводительных ЭВМ и обрамляющих их графических дисплеях, графопостроителях и т. п. Так наиболее совершенная продукция микротехнологии предшествующего поколения служит основой проектирования следующего.

Структурное проектирование совершенно изменило характер отношений между разработчиком электронной аппаратуры и технологом. Опираясь на базу данных САПР (к ней с все большим основанием начинают применять определение «база знаний»), специалист по электронике и вычислительной технике разрабатывает полный проект необходимой интегральной схемы, включая фактически и общее описание технологического процесса ее производства, практиче-

ски не зная технологии. Автоматизированное технологическое производство воспринимает задание разработчика в виде комплекта машинных программ на машинных носителях и выпускает продукцию, функции которой технологи также могут не знать. Необходимые тесты для проверки готовой продукции входят в комплект документации заказчика.

Возникла концепция «кремниевой мастерской», или «кремнелитейни»: технологического предприятия, которое как бы отливает готовые кремниевые устройства по заданной «форме» и в кратчайшие сроки. Так впервые за всю историю технологии удалось совместить, казалось бы, несовместимое: массовое дешевое производство и индивидуальное удовлетворение запросов.

Из микротехнологии структурное проектирование стремительно начало распространяться на все области технологии — от пошива одежды и обуви до автомобилестроения и строительства промышленных и жилых зданий. Перевернулась, почти буквально встав с головы на ноги, вся мировая технология. И в основе всего не только «личный пример» микротехнологии, но и главное — САПР, т. е. ее продукция.

Однако пока технология развивается, в ней нет окончательно решенных проблем. Более того, их число растет и множится с преодолением каждого очередного рубежа. Да и принципы работы приборов — продукции микротехнологии — непрерывно усложняются, в связи с чем возникают не менее сложные физические проблемы. Впрочем, на определенном уровне развития микроэлектроники технологические и физические проблемы становятся неразделимыми.

Все эти проблемы в совокупности устанавливают абсолютный предел миниатюризации транзистора на уровне примерно $0{,}3 \times 0{,}3 \times 0{,}3$ мкм^3. Однако абсолютный предел не обязательно соответствует оптимальному решению. В сверхминиатюрных транзисторах плотности тока таковы, что ионы металла выносятся из узлов решетки электронным ветром или полем, плотность выделяемой мощности в отдельных точках кристалла выше, чем на поверхности Солнца, электроны туннелируют сквозь сверхтонкие слои диэлектрика, фиксируясь на различных ловушках, создавая встроенный заряд и совершенно изменяя параметры прибора. От принципа пропорциональной миниатюризации не остается и следа: все характеристики приборов становятся нелинейными.

В конечном счете оптимальной оказывается миниатюризация транзистора до уровня $1 \times 1 \times 1$ мкм^3. В принципе это позволяет разместить на пластине диаметром 200 мм до 30 000 000 000 транзисторов в одном «уровне», если же мы сможем реализовать более плотную «трехмерную» упаковку, т. е. расположить транзисторы в несколько этажей, чередуя каждый этаж с разделительным слоем диэлектрика, степень интеграции пропорционально возрастет. Скажем, если бы удалось создать твердотельную интегральную структуру в виде куба емкостью 1 л, то в нем можно было бы разместить тысячу триллионов (!) транзисторов. Но реально ли это? Да и какие возможности это открыло бы перед системами, перерабатывающими информацию?

Такого количества транзисторов хватило бы с избытком, чтобы создать запоминающее устройство для хранения всей информации, накопленной человечеством. Если же соорудить на их основе вычислительную систему, она будет содержать не менее миллиарда процессоров с «валовой» производительностью около ... 1 000 000 000 000 000 000 операций в секунду!

Все это неизмеримо больше непосредственных информационных потребностей человечества. Естественно возникает вопрос: нужно ли стремиться к созданию подобных систем и бесконечному совершенствованию технологии? Ответ, безусловно, положителен. Все дело в том, что новая технология только на первых шагах «работает» на удовлетворение сложившихся потребностей людей. Затем она во все большей степени замыка-

ет свои технологические циклы, потребляя основную долю энергии, сырья, даже собственной продукции на поддержание и развитие своего организма.

В данном случае информация служит и «топливом», и «сырьем», и продуктом, и лишь небольшая (по объему, но не значению) ее часть выходит во внешний мир для общения с человеком на лаконичном смысловом языке все более высокого уровня. Электронное моделирование реального мира, осуществляемое на ЭВМ, требует обработки неизмеримо бóльшего объема информации, чем содержит конечный результат, представляется ли он в форме предсказания предстоящих событий или в форме управляемых сигналов. Чем больше объем памяти машин и чем выше их производительность, тем точнее и глубже электронные модели и тем в итоге точнее наша собственная ориентация во времени и пространстве, наше предвидение естественного хода событий и последствий наших действий. Иными словами, электронное моделирование становится неотъемлемой частью интеллектуальной деятельности человечества, и естественно сопоставить «электронный мозг» с природным.

Мозг человека содержит, видимо, около 10^{11} нейронов, функции каждого из которых значительно совершеннее, чем электронного процессора. Но дело не только в числе нейронов. Каждый нейрон связан прямыми каналами с 1000, а иногда и с 10 000 соседей. И именно эта невообразимая сложность организации связей поражает прежде всего даже при самом поверхностном ознакомлении со структурой мозга. Связи обеспечивают универсальность нейронного моделирующего аппарата, его гибкость, способность к неожиданным решениям и чрезвычайно высокое эффективное быстродействие при решении сложных задач. Так что, очевидно, не возникает сомнений в целесообразности развития технологии. Вопрос лишь в том, достижима ли для кристаллических структур сложность организации мозга?

В период создания первых поколений интегральных схем связи казались в них лишь простым дополнением к транзисторам. Но еще на дальних подступах к микронному рубежу вместе с предсказанием проблем, которые связаны с его преодолением, в числе важнейших из этих проблем автором этих строк была названа проблема внутренних связей интегральных схем [4]. И внутренние связи действительно стали полноправной подсистемой вычислительных структур. Именно связи объединяют множество безликих микроприборов в организованную систему, способную выполнять определенные полезные действия. И связи занимают в среднем половину площади кристалла даже при той примитивной организации, которой обладают современные интегральные схемы.

Связи специализируют любое вычислительное устройство для выполнения задач определенного класса. Окончательную специализацию для выполнения задачи, решаемой в данный момент, осуществит программа. Чем большая «доля» специализации может быть поручена программам, тем универсальнее система, тем шире области ее применения, больше тиражность, ниже стоимость. Однако цена за это — снижение эффективности, производительности машины при решении каждой конкретной задачи, а некоторые задачи окажутся вообще практически невыполнимыми. В конце концов, повышая уровень универсализации, мы начнем терять не только удобство пользования машиной, но и экономичность. И чем сложнее элементная база, тем труднее достичь оптимального баланса при жесткой архитектуре аппаратных средств вычислительной техники. Следовательно, нужны гибкие, перестраиваемые внутренние связи. Такие связи — не просто пассивные соединительные линии, но, по существу, активная часть внутренней структуры ЭВМ, и для их эффективной реализации нужны и новая технология, и новые физические принципы.

В конце концов именно связи уста-

навливают фундаментальные технологические ограничения послойного синтеза планара [5]. Оказывается, последовательное совмещение плоских рисунков в принципе не позволяет создать структуру, соизмеримую по сложности внутренней организации с мозгом. Впрочем, это обстоятельство не должно нас обескураживать: назначение кристаллических информационных структур — не соперничество с человеком, а подчиненное его интересам партнерство. И здесь электронным системам принадлежит большое будущее.

Технология ближнего субмикронного диапазона, которой предстоит еще преодолеть ряд серьезных технических трудностей, но в рамках в основном хорошо изученных принципов, позволит создать интегральные структуры на целых подложках диаметром до 200 мм, обладающие емкостью памяти до нескольких миллиардов бит информации (примерно до одного гигабайта) и содержащие до тысячи универсальных процессоров (или до десятков тысяч специализированных). Они будут содержать внутренние системы самодиагностики, резервирования и саморемонта, без которых уже в наиболее сложных структурах конца 80-х гг. невозможно обеспечить ни должного технологического выхода, ни надежности.

Важнейшая проблема в таких структурах — отвод рассеиваемой ими мощности. Они будут базироваться на самых экономных в энергетическом отношении элементах, хотя бы и ценой известной потери быстродействия: выигрыш в системном быстродействии многопроцессорной машины с лихвой окупит эти потери. Проблему отвода мощности еще сложнее решать в структурах с трехмерной интеграцией. Конечно, представление о структурах с 1000 и более уровней фантастично, но один или несколько десятков уровней станут со временем реальностью, и это позволит дополнительно увеличить объем памяти машины, значительно более экономной по затрачиваемой энергии, чем ее логика. Все же мощность потребуется немалая, и в специальных случаях интегральная структура будет охлаждаться жидкостью, циркулирующей по микроканалам, сформированным в теле кристалла средствами той же микротехнологии. Это позволяет отводить до 500—800 Вт с каждого 1 $см^2$ площади кристалла, свыше 100 кВт с целой пластины. С помощью эпитаксии можно вырастить алмазную пленку с обратной стороны пластины, и если удастся в ней сформировать микроканалы, верхний предел отводимой мощности превысит 1 000 000 Вт на пластину! Не следует считать эти величины абсолютно надуманными: даже самый экономный вентиль рассеивает при комнатной температуре не менее 10^{-15} — 10^{-14} Вт/бит, и если 10^{10} вентилей будут одновременно функционировать с частотой 10^{10} Гц, на пластине будет выделяться 10^5—10^6 Вт, что допустимо только в системах специального назначения.

Для индивидуального пользователя важно другое: в рамках известных сегодня физико-технологических принципов реально создание в ближайшие 15—20 лет карманных устройств. Они смогут вести с человеком диалог на различных естественных языках, причем не только воспринимать команды с голоса, но и синтезировать внятную речь, грамотно переводить (разумеется, синхронно) с любого языка на любой другой, быть личным врачом-диагностом, личным секретарем и экономистом, личным энциклопедическим справочником и карманной библиотекой с собранием сочинений из многих сотен томов, а при необходимости выводить информацию на цветной плоский экран или бумагу и т. д. Все это уже делается в экспериментальных системах, но важно именно то, что развитие технологии позволит проинтегрировать эти достижения в легких, компактных карманных устройствах, доступных каждому человеку. Другие цели — преобразование всех сфер труда, устранение из него рутинных, утомительных, вредных и опасных для здоровья человека операций и профессий. Достигается это прежде всего интеллек-

туализацией технических средств.

Совершенно преобразятся и принципы научных исследований, и социальное управление, и конечно, сама технология, включая технологию защиты среды нашего обитания. В то же время стремление человечества раздвинуть земные рамки своего обитания приобретает новую опору благодаря внедрению средств автоматизации.

Таковы важнейшие цели, ради которых преодолевается сегодня с таким огромным напряжением сил и с такими огромными затратами средств микронный рубеж. А что за ним?

За горизонтом микрона

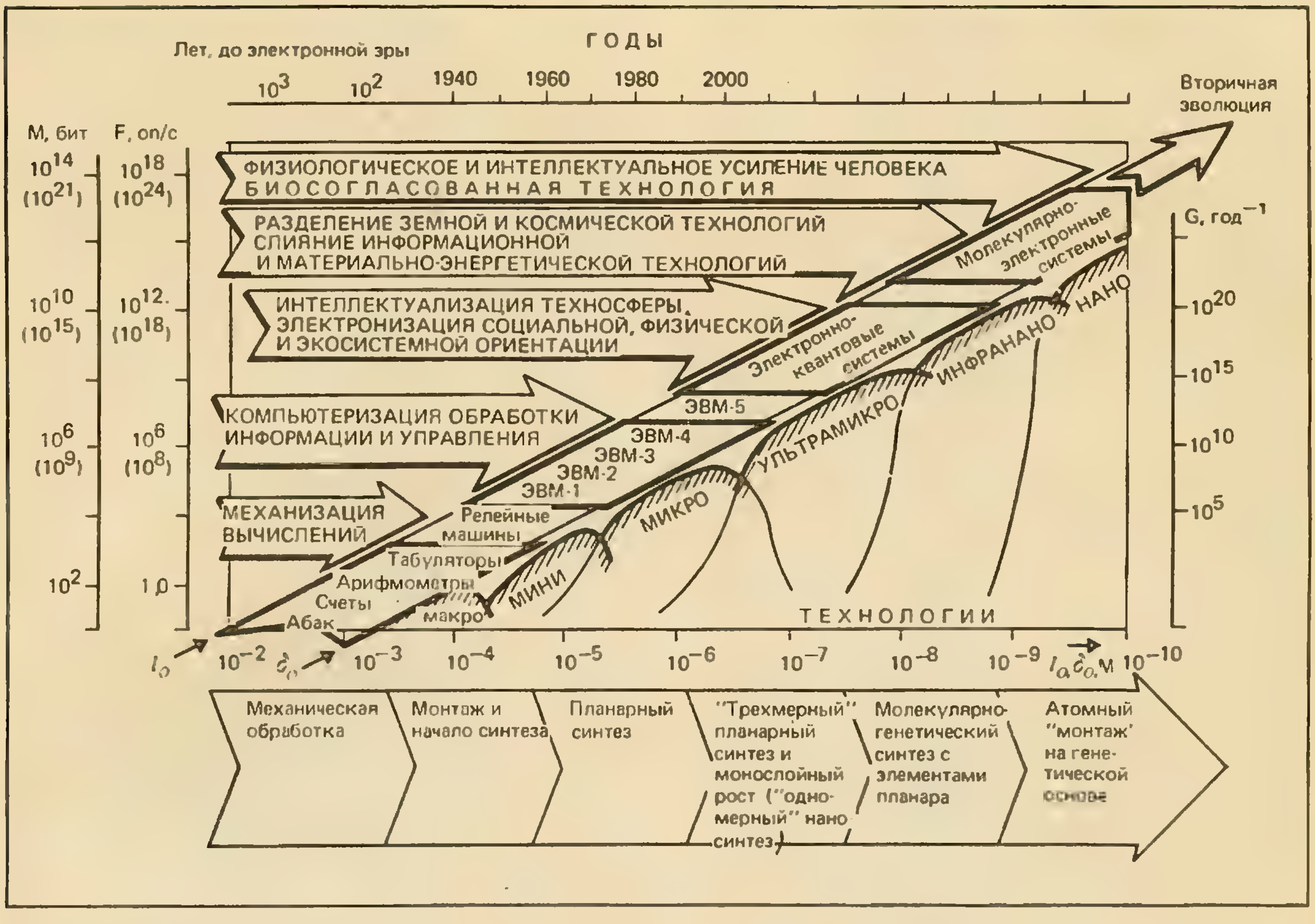
Если диапазон 1,0—0,5 мкм представляет собой технический барьер (чрезвычайно сложный для преодоления, поскольку требует смены всего парка технологической аппаратуры и самих принципов ее работы), то диапазон линейных размеров 0,05—0,1 мкм — это фундаментальный физический барьер. Практически все свойства твердого тела, включая его электропроводность, резко изменяются и «сопротивляются» дальнейшей миниатюризации. Конечно, любое размерное явление можно с пользой применить для решения той или иной конкретной задачи. Однако если до ширины проводника 0,1 мкм еще как-то можно было опираться на принцип пропорциональной миниатюризации, то за этим барьером возрастание сопротивления связей происходит экспоненциально. При линейном размере транзистора менее 0,3 мкм и ширине линии 0,1 мкм потери даже на кратчайших линиях внутренних соединений «съедали» бы до 90% сигнала по уровню и мощности. Это, конечно, не означает, что подобная миниатюризация никогда не понадобится: все, что физически допустимо, может иметь и определенный технический смысл. Но и физические принципы действия, и системотехника таких структур, и алгоритмы обработки информации должны быть радикально иными.

Итак, эстафета продолжается.

6. Проектная норма $l=0{,}1$—0,1 мкм. Это также фактически два этапа: 1,0—0,3 и 0,3—0,1 мкм. Если бы внутренний мир таких действующих систем стал наблюдаем, мы бы увидели не отдельных бегунов, а миллионноногий клубок. Наглядные образы теряют свою силу в этом странном мире. Проектирование таких систем и не должно опираться на наглядные представления. Вместо них используются электронные модели, основанные на технических и программных средствах предшествующего поколения. Но если физика, на которой основана обработка информации, усложняется, то физика, на которой основана технология изготовления этих устройств, изменяется принципиально. Вместо обычной химии — химия высоких энергий, вместо печей — ускорители и лазеры, вместо световых лучей — электронные, ионные, рентгеновские.

При минимальном размере деталей внутренней структуры интегральных схем 0,1—0,2 мкм достигается оптимум, ниже которого все характеристики транзистора быстро ухудшаются. При этом начинают проявляться эффекты квантовой связи, в результате чего твердотельное устройство становится системой, действие которой основано на коллективных электронных процессах. Проектная норма $l=0{,}1$ мкм (100 нм) — это нижний предел твердотельной микроэлектроники, основанной на классических принципах синтеза схем. Чего следует ожидать за этим рубежом?

7. Проектная норма $l=0{,}1$ — 0,01 мкм (100—10 нм) — два или три новых этапа. Это размеры вирусов и «деталей» их структуры. Если микронный рубеж трудно преодолеть технически, то первый субмикронный пока даже психологически. Далее не работают не только привычные наглядные представления, но и привычные теоретические модели. Мир становится не только нелинейным, но и существенно квантовым, вероятностным и неопределенным. Приходится считаться с непредсказуемостью поведения каждой частицы и вместе с тем со странным коллективизмом их общего поведения. Безумная эстафета, где каждый



Разрешающая способность технологии и ступени прогресса: l_0 — проектная норма; G — ежегодная мировая мощность технологии (в количестве изделий с минимальными для своего времени проектными нормами): F — максимальная производительность серийных ЭВМ (операций в секунду); M — соответствующая емкость ЗУ.

участник в любой момент может нарушить любое правило. Однако так ли она безумна? Мы должны точно считать, чтобы расплатиться в магазине, но так ли нужна эта точность и однозначность в сложных жизненных ситуациях? Достаточно ли ее хотя бы для того, чтобы открывать новые физические законы? И если можно «поверить алгеброй гармонию», например, установить строгую ритмику в мазурках Шопена с помощью современных ЭВМ, то уж заведомо бесполезно ожидать от ЭВМ (хотя бы и 5-го, и 6-го поколений) шопеновского или шагаловского «полета».

Неопределенность жизненно необходима, но в гармонии с определенностью. Как достичь этой гармонии? — вот вопрос. И как практически создавать искусственные системы, которые могли бы нам помочь в его решении? Ведь далее еще более сложные этапы.

Диапазон от 100 до 10 нм еще принадлежит кристаллической электронике, но электронике квантовой в своей основе, сочетающей определенность, детерминированность цифровой системы с квантовой случайностью поведения «наноэлементов». Такие системы должны стать принципиально новым средством отображения реального мира — физического, биологического, социального, прогнозирования естественных процессов и оптимизации искусственных систем и их поведения.

Но следующие этапы эволюции технологии уже практически не принадлежат твердотельной электронике.

8. Проектная норма l=10—1,0 нм. Диапазон размеров простых биомолекул.

9. «Проектная норма» l=1,0—0,1 нм. Диапазон размеров отдельных атомов и простейших молекул.

Истинным «владельцем» этих диапазонов должна стать грандиозная научно-технологическая область, кото-

рая сегодня еще кажется полуфантастической, но которой предстоит преобразовать весь создаваемый человеком мир в следующем, XXI веке.

Нанотехнология, или Монтаж нового мира из отдельных атомов

Фантазия или научное предвидение будущей цивилизации!

Сколь ни далеки вершины нанотехнологии, их штурм готовится одновременно с разных флангов: неуклонное повышение разрешающей способности микротехнологии, пока не будут достигнуты нанорубежи; развитие биотехнологии, и прежде всего технологии рекомбинантных ДНК (генной инженерии), до такого состояния, пока биосинтезу не станут подвластны не только рекомбинация и коррекция существующих в природе генов, но и создание новых, «запланированных» (как это имеет место в микротехнологии) информационных и структурных форм; попытки найти молекулярные формы, обычно биоподобные, которые могли бы воспроизводить функции информационных машин или механических автоматов («молекулярная электроника», «нанороботы» и т. п.); исследование электронных, механических и других функций биомолекулярных структур.

Как видим, поиск ведется во встречных направлениях, и на соприкосновении фронтов возникают новые научно-технологические области знаний. В этом невообразимо сложном и пока окутанном туманами мире важной опорой и ориентиром служит моделирование структур и явлений программно-аппаратными средствами электронной вычислительной техники.

Можно выделить несколько уровней моделирования. Первый из них — САПР — уже кратко обсуждался. По существу, это передоверенное программно-аппаратным средством техническое проектирование.

Следующий — моделирование новых поколений элементов ЭВМ, подсистем машин и целых ЭВМ — включает уже глубокий физический анализ будущих устройств и ключевых процессов технологии их производства.

Более глубокое моделирование оптимизирует всю совокупность физико-технологических решений элементов и аппаратуры ЭВМ до теоретических пределов миниатюризации, интеграции, полезных характеристик. Это одна из сложнейших задач моделирования, решаемая комплексными коллективами специалистов самого различного профиля и высшего уровня квалификации. Для электронного моделирования этого уровня используются наиболее мощные из уже созданных супер-ЭВМ со всем арсеналом самых совершенных периферийных устройств вычислительной техники и наиболее совершенных экспериментальных систем физико-технологического моделирования. На последних можно апробировать некоторые из новых решений и изготовить порой уже сегодня полезные устройства. Часто это бывают устройства, позволяющие усовершенствовать сами технологические процессы. Этот уровень моделирования не может быть превышен по своей сложности на данном этапе развития науки, технологии, техники. Но более глубокие уровни отличаются своей направленностью: моделирование электронных процессов в кристалле, молекулярных структурах, в биоструктурах, наконец, моделирование поведения нейронов и нейронных сетей.

Моделирование нейронных сетей — одно из самых волнующих направлений современных научных исследований. Каждый успешный шаг здесь помогает нам понять самих себя, механизм процессов, лежащих в основе нашей психики и интеллекта. Одновременно он может послужить указующей стрелкой в пути от микротехнологии и микроэлектроники к нанотехнологии и наносистемам. В самом конце настоящего десятилетия здесь наметилась поддержка с другой стороны (впрочем, с той, которую некоторые исследователи, в том числе автор этих строк, предвидели ранее). Оказалось, что многопроцессорные ЭВМ способны

самообучаться при решении некоторых задач более эффективно, чем могли предположить создатели их аппаратной основы и программного обеспечения. Иными словами, достигая некоторого критического уровня сложности, вычислительные структуры обретают внутренние степени свободы и, пусть пока простейшую, способность к саморазвитию.

Если сопоставить технологию интегральных твердотельных структур и технологию вакуумных ламп, то практически невозможно уловить преемственность между ними. Однако эта преемственность имеется, но не в характере отдельных операций, выполняемых в производстве вакуумных ламп и кристаллических интегральных схем, а в принципах «электронного зодчества», проектирования электронных систем. Точно так же мы не вправе ожидать непрерывного перехода микротехнологии в нанотехнологию, прямой подсказки, как делать наноструктуры. Но существующая научно-технологическая идеология в своих самых глубинных основах, безусловно, переживет грядущие технологические революции, а создаваемые на ее базе технические средства начинают уже активно способствовать нашему продвижению, и оно продолжается уже не совсем «вслепую».

Достижения конца века

Нанокристаллы, нанолитография, пленки атомной толщины, микроскопы атомного разрешения, атомный манипулятор. Самый простой (в идейном смысле, но не практически) путь в будущее — это продолжение существующих тенденций. Кристаллы, пленки и литография — три кита микротехнологии, и их прежде всего стремятся подготовить к вторжению в наномир путем совершенствования известных технических средств.

Как ни странно, прогресс в микроэлектронике связан не с уменьшением, а с увеличением размеров кристаллов: чем больше диаметр подложки, тем больше шанс найти на ней требуемый по размеру бездефектный участок, а следовательно, больше максимально достижимая площадь чипа с приемлемым выходом годной продукции, выше степень интеграции, да и производительность технологии возрастает. Но одновременно совершенствуется качество кристалла. Дислокации и дефекты упаковки, грозные противники ранней микротехнологии, теперь практически отсутствуют. Но сражение идет против «кластеров» точечных дефектов — нанообразований, возникающих вокруг групп примесных атомов (кислорода, углерода и др.). Так что выращивание кристаллов для микроэлектроники — область, где задачи нанотехнологии как бы выворочены наизнанку: кристаллы должны становиться все более крупными, а нанообразований в них должно быть как можно меньше. К этому следует добавить и проблему чистоты: в приборе нанометрового диапазона даже один атом нежелательной примеси окажет негативное воздействие на поведение активной области.

Однако представляет несомненный интерес вопрос: каковы минимальные размеры твердого тела, при которых оно еще сохраняет свои кристаллические свойства? Один из подходов, позволяющих ответить на этот вопрос, — осуществление кристаллизации путем мгновенного охлаждения паров вещества, смешивая их с потоком холодного инертного газа. При этом выделяются действительно нанокристаллы — их размер в поперечнике не превышает десятков атомных диаметров. Таким путем идут некоторые японские кристаллографы. При достаточно малых размерах огранка кристалликов изменяется, они становятся почти округлыми. Но, в общем, вплоть до размеров порядка 2—3 нм (нескольких сот атомов в объеме нанокристалика) вещество еще сохраняет свою кристаллическую индивидуальность. Правда, в количественном отношении эти свойства претерпевают существенные изменения. Например, уже давно известно, что точка плавления малых порций вещества может снижаться на многие десятки градусов. Не отдавая себе в том отчета, мы сталкиваемся с

этими явлениями при резкой смене метеорологических условий. Однако работать с нанокристалликами и измерять их свойства крайне неудобно.

Другой возможный подход — исследование тонких нитевидных кристаллов — «вискеров» (по-русски — «усов»). Усы могут иметь наноразмеры по диаметру и почти неограниченную длину, что делает их весьма удобным объектом механических и электрических измерений. Будучи практически свободны от структурных несовершенств, усы имеют почти теоретический предел механической прочности. Это обстоятельство известно уже многие десятилетия. В 50-х гг., будучи еще школьником, автор этих строк обнаружил, что нитевидные кристаллы серебра, вытесняемые из раствора азотно-кислой соли, растут с необыкновенно высокой скоростью целыми популяциями, причем популяции эти борются друг с другом за жизненное пространство, вырываются вперед или гибнут, примитивно иллюстрируя некоторые черты соперничества в живом мире [6]. Десятилетием позже удалось наблюдать групповые процессы зарождения и роста вискеров германия в эпитаксиальных реакторах. Эти процессы привлекли внимание многих исследователей в СССР, и некоторые из них продолжают работы в этом направлении. Для целого ряда приборных задач вискеры дают почти готовое решение, например для создания многоострийных эмиттеров электронов. В связи с проблемами нанотехнологии кажется привлекательным научиться выращивать нити горизонтально вдоль определенных кристаллографических направлений подложки, и использовать их, в частности, в качестве внутренних связей высокоорганизованных интегральных структур. Но все-таки главное направление прогресса сейчас принадлежит не нанокристалликам и не вискерам, а тонким пленкам.

Пленки всегда опережали миниатюризацию литографических рисунков схем. Уже во многих современных полевых транзисторах используются пленки диэлектрика толщиной в единицы нанометров. Особенно важную роль они играют в энергонезависимых (сохраняющих информацию при обесточивании схемы) полупроводниковых запоминающих устройствах.

Другой яркий пример прибора, где сверхтонкие пленки нанометрового диапазона играют поистине фундаментальную роль, — туннельные сверхпроводящие переходы Джозефсона. В последних особенно важна однородность сверхтонкого диэлектрика, поскольку характеристика туннельного перехода экспоненциально зависит от толщины изолирующего промежутка между электродами. Флуктуации этого параметра — настоящий бич «джозефсоновской технологии». Здесь, правда, найдено немало остроумных решений, в частности анодное окисление в растворах или в плазме, — процесс, контролируемый локальным электрическим полем на каждом участке растущей пленки. И хотя от окончательного решения проблема еще далека, она служит хорошей школой новой технологии и инженерной психологии.

Однако «высшая школа» нанопленочной технологии сегодня — это сверхрешетки. Мы уже упоминали об этих структурах, где наряду с естественным периодическим упорядочением атомов по узлам кристаллической решетки существует «сверхпорядок» с периодом от единиц до десятков параметров кристаллической решетки, т. е. примерно от одного до десяти нанометров.

Такие структуры нередко образуются и естественным путем. Некоторые сплавы взаимно нерастворимых элементов затвердевают с образованием упорядоченных эвтектик типа сверхрешеток. Другие сплавы образуют твердые растворы, которые при определенных условиях распадаются на сверхрешетки. Но порядок в них не очень строгий, да и компоненты сверхрешетки нельзя выбирать произвольно.

Существует также обширный класс соединений, в которых естественная кристаллическая структура слоиста, причем связи между атомами в пределах каждой атомной плоскости намного короче и намного сильнее, чем между слоями (например, графит,

сульфиды молибдена и некоторые другие металлы). Некоторые из таких веществ обладают удивительной способностью как бы впитывать между этими слоями молекулы других веществ из растворов. Получается «наполеон», в котором слои двух различных веществ чередуются с периодом менее нанометра. Это уже довольно строгие сверхрешетки (они называются интеркаллированными), но и здесь мы весьма ограничены в выборе веществ, а сверхпериод нам жестко навязан.

Задача синтеза искусственной сверхрешетки, состоящей из чередующихся слоев двух полупроводников, была впервые четко поставлена в начале 70-х гг. японским исследователем, работающим в США, Л. Эсаки. Основная идея, которой он при этом руководствовался, состояла в том, что при периоде сверхрешетки меньше дебройлевской длины волны электрона последний сможет квантовомеханически просачиваться, туннелировать сквозь барьеры межслойных переходов. При этом должен возникнуть эффект отрицательной проводимости, на котором в принципе можно строить сверхбыстродействующие приборы, излучатели с перестраиваемой длиной волны и другие заманчивые устройства.

Еще в 50-х гг. накануне рождения микроэлектроники Эсаки создал туннельный диод, который действительно обладал предельным для своего времени быстродействием. Кстати, в туннельном диоде металлургическая ширина *p-n*-перехода (область, где изменяется доминирующая легирующая примесь и тип проводимости полупроводника) составляет единицы нанометров. Создание таких структур требовало высшего технологического искусства своего времени. Однако именно из-за сверхрезкого перехода эти структуры были нестабильны.

Современные сверхрешетки создают, как правило, из слоев различных материалов, где от слоя к слою варьируются не малые концентрации примесей, а концентрация основного вещества. Такие структуры много стабильнее.

Чтобы синтезировать сверхрешетку, необходимо создать почти идеально гладкую поверхность подложки и научиться резко изменять состав поступающего к ней потока кристаллизующегося вещества, все время поддерживая в камере кристаллизации условия, необходимые для образования совершенных эпитаксиальных пленок. Условия эти в значительной степени противоречат друг другу: для того чтобы успевать достаточно резко изменять состав потока и для того чтобы атомы кристаллизующегося вещества успевали занять правильные положения в узлах кристаллической решетки подложки (точнее, ранее сформировавшихся на ней слоев), необходимо вести процесс достаточно медленно. Тем более что температура кристаллизации должна быть по возможности низкая, иначе уже выращенная структура будет размываться диффузией. Но чем медленнее растут слои, тем больше опасность загрязнения их примесями из камеры кристаллизации. Необходим поистине космический вакуум (примерно 10^{-10} мм рт.ст.).

Как совместить все эти условия? В экспериментальных установках синтеза сверхрешеток молекулярные лучи (точнее их было бы назвать атомными) различных веществ направляются к подложке по сигналам ЭВМ, причем непрерывно контролируется плотность каждого такого луча и электронно-дифракционная картина, которая позволяет приблизительно оценить структуру поверхностных атомных слоев растущей пленки. В режиме прерывания процесса можно провести более точный анализ структуры и распределения ее состава по толщине. Эти автоматизированные сверхвысоковакуумные комплексы молекулярно-лучевой эпитаксии — один из шедевров современной технологии, где объединяются достижения новейшей техники, информатики, экспериментальной физики и технологического искусства. Что же касается достижений самой молекулярно-лучевой эпитаксии, то это прежде всего сверхрешетки с практически атомно-резкими граница-

ми между слоями нанометровой толщины: число слоев в каждой сверхрешетке десятки или сотни, в каждом случае обычно синтезируются сверхрешетки, содержащие два элемента, соединения или их твердые растворы, но в целом испытаны многие десятки различных веществ (в основном полупроводниковых, но есть и металлические, и металл-диэлектрические сверхрешетки).

Сверхрешетка — это первый прорыв технологии в область, которая ранее представляла абсолютную прерогативу Природы: создание микроструктуры вещества. И этот шаг уже увенчался внушительными достижениями, новые физические явления посыпались как из рога изобилия. Достаточно сказать, что в некоторых сверхрешетках время жизни носителей заряда повысилось на несколько порядков. Да и не только сверхрешетки, но и гетероструктурные транзисторы, содержащие всего лишь несколько слоев различных полупроводниковых соединений, выращенных по технологии синтеза сверхрешеток, обрели рекордные параметры.

И однако главную задачу, ради которой и были первоначально развернуты эти работы, — создание структур с ярко выраженной отрицательной проводимостью, туннельным эффектом, — удовлетворительно решить не удалось. И причина этого — фундаментальная особенность технологии. Твердотельный синтез, опирающийся на точные измерения и управляющую технику, фактически регулирует усредненный состав вещества, он создает условия, при которых предпочтительными, более вероятными становятся определенные акты присоединения или отрыва атомов тех или иных элементов в тех или иных структурных позициях. Но у него нет никаких средств борьбы с флуктуациями — случайными отклонениями от среднего состава, локальных несовершенств в малых областях формируемых структур.

Однако развивающаяся технология — не только потребитель, но в еще большей степени генератор идей. В ходе поиска, экспериментов, наблюдений над реально существующими процессами открываются совершенно новые перспективы.

Выяснилось, что при определенных условиях эпитаксиальный рост протекает последовательно слоями моноатомной или мономолекулярной толщины (такие процессы получили название соответственно атомно-слоевой и молекулярно-слоевой эпитаксии). Это происходит, если скорость движения ступеней уже образовавшегося, но еще не завершенного слоя много выше вероятности зарождения центров нового. В таких случаях атомы, конденсирующиеся на поверхности, имеют неизмеримо больше шансов «свалиться» в поры еще недостроенного слоя и испариться вновь, чем образовать новые центры. Когда же процесс достройки предшествующего слоя завершается, плотность одиночных атомов, вновь адсорбированных на его поверхности, резко возрастает, вероятности их столкновения и образования новых центров скачкообразно повышаются, и начинается строительство следующего. Собственно, этот эффект был предсказан много ранее теоретически, и, в частности, путем моделирования эпитаксиального роста на ЭВМ. Однако реально его наблюдать можно лишь в условиях сверхчистого эксперимента, которые стали доступны в 80-е гг.

Какими бы изощренными ни были технология и техника управления технологическими процессами, они не могут управлять поведением каждого отдельного атома. Технология — это управление естественными процессами, направленное на создание искусственных объектов: эффективна она только постольку, поскольку ей удается создать необходимые условия для того, чтобы нужные процессы протекали в нужном русле и направлении. Молекулярно-слоевая и атомно-слоевая эпитаксия частично решают именно эту задачу. Но наиболее эффективный подход к ней был найден еще в прошлом веке, хотя и почти забыт на длительное время.

В 1880—1890 гг. молодой немецкий ученый Агнесса Поккельс, экспериментируя на собственной кухне, обна-

ружила способность некоторых органических жидкостей растекаться по водной поверхности в виде пленок исчезающе малой толщины. Позже, в 1910—1920 гг. исследования адсорбции продолжил уже упоминавшийся выше Ирвинг Ленгмюр. Он установил основные закономерности этого явления и предложил новую теорию адсорбции. И все же решающий шаг вновь был сделан молодой женщиной. В 1930—1935 гг. Катерин Блоджетт придумала способ перенесения мономолекулярных слоев на твердую подложку. Более того, повторяя эту процедуру, она сумела синтезировать многослойные пленки. Позже (в 1937 г.) она усовершенствовала эту технологию совместно с Ленгмюром (откуда и появились пленка и технология Ленгмюра — Блоджетт). Эти исследования прервала война. Интерес к эффекту несколько возродился только в 50-х гг. Одна из первых работ этого периода была также выполнена молодой девушкой Маргарет Робертс (позже ставшей премьер-министром Великобритании Маргарет Тэтчер).

Примерно десятилетие спустя Ханс Кун в Институте биофизической химии им. Макса Планка в Геттингене усовершенствовал методику синтеза мономолекулярных слоев и впервые сумел синтезировать тонкопленочные структуры, обладающие полезными оптическими свойствами. Сам факт выполнения такой работы в биофизическом институте символичен, поскольку предвосхищает будущее объединение принципов твердотельного и биосинтеза. Пока же физики и биологи соревновались на расстоянии. В середине 70-х гг. Г. Робертс, руководитель прикладной физики и электроники Даремского университета в Англии, нашел способ применения мономолекулярных пленок, синтезируемых методом Ленгмюра — Блоджетт, для формирования изолирующих слоев в некоторых электронных приборах. Для этого, в отличие от предыдущих исследователей, основным объектом изучения которых были жирные кислоты, он использовал фталоцианин, устойчивый до 400° С.

Мономолекулярные и формируемые их последовательным нанесением полимолекулярные пленки уже находят многообразные применения: как диэлектрики кремниевых и некремниевых полупроводниковых приборов (там, где нельзя использовать собственный оксид кристалла); в качестве смазывающего покрытия магнитных носителей информации; как материалы, чувствительные к различным химическим веществам; при создании тонких мембран, чрезвычайно важных для новейших направлений развития химической и биохимической технологий. В информационной технике они пока наиболее успешно применяются при изготовлении оптических запоминающих устройств и плоских дисплеев, электронно-оптических и пироэлектрических детекторов. Находят они применение и в технологии интегральных схем как сверхтонкий резист. Однако нет сомнения, что в будущей технологии молекулярной электроники адсорбированные методы синтеза пленок займут одно из почетных мест. Уже сейчас им посвящаются специальные международные конференции. Создание вещества с расчетной молекулярной архитектурой по методу Ленгмюра — Блоджетт получило название «молекулярное зодчество».

Но если адсорбционные явления открывают путь от микротехнологии к нанотехнологии через «двухмерный мир», микролитография стремится проделать тот же путь через «линейный мир» бегущего луча.

В принципе уже существуют устройства, позволяющие сфокусировать электронный или ионный луч до нанометрового диаметра. И хотя техника такой фокусировки еще не вполне совершенна, а плотность частиц в пучке недостаточно высока, главные проблемы в другом.

Одна из них — чрезвычайно низкая производительность техники сканирования — уже отмечалась. Другая — проблема адекватных задачам нанолитографии электроно- и ионо-резистов. Органические резисты для этой цели мало подходят: их молекулярная структура слишком крупноблоч-

на, и предельное разрешение недостаточно. Известны неорганические резисты, например, некоторые полупроводниковые соединения класса халькогенидов. Другой путь представляет уже рассмотренный нами процесс ионностимулированной полимеризации углеродсодержащих соединений. Образующаяся «алмазоподобная» пленка может сама служить резистом, но можно воспользоваться и предварительно нанесенной на подложку сверхтонкой пленкой металла: химическое травление ее через окна алмазоподобной пленки выполняет как бы функции проявления в таком микро- или нанолитографическом процессе. И хотя проблема производительности остается пока нерешенной, существующие методы позволяют получать линии шириной в несколько нанометров.

Однако настоящим рекордсменом в области разрешения, сколь это ни кажется парадоксальным, оказывается механика. Правда, механика не совсем обычная. Пьезоэлектрический эффект — механические напряжения и деформации кристалла под действием электрического напряжения — позволяет создать управляемый зонд для перемещения с субатомной точностью во всех трех направлениях. Ниже мы еще обсудим мыслимые пути реализации нанотехнологии, но сейчас говорится о реально действующих системах. Такой привод уже создан во многих лабораториях мира. Более того, в сочетании с другим эффектом — туннелированием электронов через нанометровый вакуумный промежуток — он позволяет регистрировать расстояние между зондом и подложкой с точностью лучше 10^{-10} м, что делает как бы «видимыми» электронные оболочки отдельных атомов. Мы знаем, что квантовая механика «запрещает» такую визуализацию. Но в действительности каждая картина создается тысячами и тысячами электронов, т. е. носит усредненный характер, что совершенно не запрещено принципом неопределенности. С созданием туннельного микроскопа (так был назван этот удивительный прибор) человек впервые обрел возможность ясно и непосредственно наблюдать отдельные атомы, их расположение в кристаллической решетке, точечные дефекты последней. Ранее все это было объектом чистой теории и косвенных измерений. Не удивительно, что, хотя уже в древнем мире возникло представление об атомистическом устройстве мира, до 50-х гг. даже в стане физиков находились скептики, считавшие это лишь удобной моделью.

И все же совершенствование технологии твердотельного синтеза, микротехнологии не открывает прямого пути в нанотехнологию, как технология каменного топора не открыла непосредственно технологии топора железного, как металлургия не открыла сама по себе эры интегральной технологии. Рождение новых технологических формаций всегда носило революционный характер. Правда, технологические революции никогда не уничтожали классических традиций, напротив, они строили, опираясь на них, новый фундамент. Каждая предшествующая технология создавала материальную и культурную базу, необходимую для появления последующей.

Мы не можем точно указать, как будет формироваться здание будущей нанотехнологии. Но очертить его общие контуры мы, видимо, уже в состоянии. Тем более что изыскания на месте его сооружения ведутся почти с того момента, когда обрела силы микротехнология.

Поиск направляют три главных маяка. 1. Молекулярная электроника — по образу современных электронных приборов и логических элементов, но через все промежуточные этапы уменьшения проектных норм. 2. Автономные самодвижущиеся наносистемы (нанороботы), обладающие чувствительными органами, устройствами обработки информации и исполнительными механизмами (по образу объектов живой природы — вирусов, бактериофагов и т. п., но с превосходящими их возможностями. Здесь минуются не только стадии уменьшения проектных норм, но и создание отдельных

элементов, предполагается лишь поэтапное усложнение структуры и функций «нанороботов». 3. Физические процессы внутримолекулярного и атомного уровней как основы любых будущих наноустройств и наносистем (минуя даже биологический уровень).

«Молекулярная электроника» — научно-техническая мечта, получившая собственное имя, как зрелая область, еще на заре развития микроэлектроники. Здесь накопилось очень большое количество наблюдений, публикаций, идей. Но фактические достижения имеются лишь в области микроисточников энергии. Сравнительно близки к реализации некоторые запоминающие устройства. В остальном мы встречаемся пока с новым типом научной фантастики, где на солидном теоретическом фундаменте строится гипотетический мир будущего. В более высокой степени это замечание справедливо для второго направления.

Мысль о создании последовательности микромашин уменьшающихся размеров, где каждое предыдущее поколение творит свое подобие меньших размеров, впервые высказал в конце 50-х годов тогда еще совсем молодой нобелевский лауреат Р. Фейнман. Миллионы и миллиарды таких машин будут выполнять все мыслимые технологические и технические функции, от обработки информации до обработки материалов. Это была самая фантастическая и смелая из всех идей, высказанных когда-либо в научных терминах. Таким образом Р. Фейнман продолжил замечательную традицию, заложенную в середине 40-х годов другим нобелевским лауреатом по физике, одним из творцов квантовой теории Э. Шрёдингером, который еще до рождения молекулярной генетики и современной биофизики ясно сформулировал их основные задачи в издании «Что такое жизнь? С точки зрения физика».

В конце 70-х годов К. Эрик Дрекслер вместе с небольшой группой энтузиастов начал исследования по нанотехнологии в Станфордском университете (США). В противоречии с классической постановкой научных работ — от исследования конкретных явлений к созданию реальных устройств шаг за шагом возрастающей сложности. Так Дрекслер шел к заветной цели, по существу сформулированной некогда Фейнманом. Но он придает ей еще большую смелость: миллиарды машин размером с митохондрию бороздят сосудистую систему человека, излечивая ее от болезней. Подобные по размерам и сложности машины обволакивают пленкой строящееся здание и как бы выращивают его, они же осваивают космос и т. д. Дрекслер черпает свои идеи из «нанотворчества» природы, прежде всего из биологического источника и, видимо, особенно из иммунологии. Он минимально апеллирует к электронике и предпочитает даже биохимические процессы трактовать с позиций биомеханики.

В то же время Р. Фейнман, ныне почетный профессор, вновь вернулся к «нанопроблеме», но теперь он доказывает возможность создания логического элемента, состоящего из нескольких атомов, в котором единичный квант энергии может служить носителем бита обрабатываемой информации. Поскольку Р. Фейнман — один из выдающихся творцов квантовой теории, его доказательство обладает значительной силой.

Поскольку мы интересуемся абсолютными ресурсами природы, можно также показать, что физический предел плотности записи информации в кристалле примерно на порядок превышает плотность упаковки атомов, т. е. в каждом кубическом сантиметре вещества можно зафиксировать почти триллион бит — неизмеримо больше накопленной человечеством информации и его мыслимых потребностей в ней.

Труднее доказать, но есть все основания предполагать, что развитие ферментативных механизмов живой природы позволит неизмеримо расширить многообразие химических свойств каждого элемента, а следовательно — и потенциальные возможности нанотехнологии по сравнению с обычной технологией. Более того, электронные оболочки отдельного атома в

принципе могут служить «чувствительным органом» наномашины, выполняет ли она функцию чтения информации или «прощупывания» окружающего мира. В действительности, мы здесь только начали фантастическое путешествие в «физически допустимый» мир, который, несомненно, когда-то станет реальным.

Эволюция — это река, текущая вверх, точнее — это множество рек, одновременно текущих вверх. Они сливаются, достигнув более высокого уровня, и в месте слияния образуются водопады преобразований, извергающихся также ввысь. С каждого нового уровня открываются еще более широкие горизонты, и так, вероятно, бесконечно. Но современникам каждого нового каскада преобразований очень важно вовремя осмотреться и сориентироваться в пределах, хотя бы доступных обозрению горизонтов.

Эпилог

В 70-е гг. нашего столетия появились три новые технологии: микропроцессорная, космическая и генная (или, по сложившейся терминологии, генная инженерия). По своей значимости для человечества все три технологии, видимо, эквивалентны, хотя и совершенно различны по физическому содержанию. И это проявляется прежде всего в том, что каждая из технологий в корне изменяет мировоззрение и творческую психологию людей.

Появление микропроцессоров означает прежде всего, что элементарной (в смысле неделимой) единицей массового производства стал миниатюрный логический автомат. Последний может быть встроен в любое устройство, от домашнего телевизора до рабочего инструмента, что придает рядовой технике принципиально новое качество — «интеллектуальность». При всей несопоставимости микропроцессора и нейрона, многопроцессорных супер-ЭВМ и мозга между ними имеются уже и определенные черты сходства: микропроцессор несет уже в себе начальные элементы разумной реакции на сигналы внешнего мира, многопроцессорные системы — содержательного и эффективного отображения многих его явлений.

Конечно, электронные средства обработки информации несравнимо беднее нейронных внутренними связями и числом элементов, а выполняемые ими функции регламентируются лишь жесткими алгоритмами. Но не следует забывать чрезвычайной молодости этого направления. В то же время быстродействие электронных элементов в миллионы раз превышает быстродействие нейронов. При этом существенно, что эволюция электронной технологии обеспечивает рост внутренней сложности и функциональных возможностей единицы продукции практически без изменения ее цены: интегральная схема усложняется, но покупатель 80-х гг. платит за каждый ее транзистор в десятки и сотни тысяч раз меньше, чем покупатель 50-х годов.

Микропроцессорная технология потенциально имеет много назначений: создание персональных электронных партнеров, интеллектуализация (в известном смысле «оживление») всей техносферы, усиление и защита функций организма с помощью персональных медико-кибернетических устройств, в том числе вживляемых в организм... Всего к моменту написания этой книжки насчитывается около 200 000 различных применений микропроцессоров.

Космическая технология, которая в отличие от микропроцессорной развивается пока относительно медленными темпами, имеет огромный потенциал в других измерениях: она не только дополняет земную технологию, но и обещает в будущем разгрузить планету от всех нежелательных производств, раздвинуть границы обитания человечества далеко за пределы его эволюционной родины.

Генная инженерия, и более широко — генная технология, призвана усовершенствовать биологию самого

человека, обогатить биосферу новыми полезными видами и послужить принципиально новым экономичным и экологичным инструментом в производстве продуктов питания и даже небиологических изделий.

Все три технологии, появившиеся в 70-х гг., непосредственно связаны с глобальными условиями существования и эволюции человеческой популяции. В истории человечества лишь немногие инновации были столь радикальны. Появление огня, каменных орудий, языка, письменности, электричества, передачи сообщений без переноса массы и т. д. давали гигантский импульс цивилизации, но непосредственно не затрагивали ни природных возможностей интеллекта, ни генетических основ жизни, ни ареала ее распространения.

В результате эволюции электронной технологии от «микро» к «нано» и ее слияния с «генной», вероятно, будет достигнуто состояние, при котором станет возможным синтез в массовых количествах любых технических устройств. Однако вряд ли в этом состоит основная цель будущей нанотехнологии. Она, по всей вероятности, сможет синтезировать структуры, способные к эволюции и саморазвитию.

И задача человечества в том, чтобы уже сейчас, на пороге новой эры, направить эту эволюцию по гуманному пути.

Литература

1. О топологической разрешимости интегральных структур без совмещений. // Микроэлектроника. — 1975. — Т. 4. — Вып. 3. — С. 213—219.

2. Применение принципа селективности в производстве интегральных схем. // Микроэлектроника. — 1976. — Т. 5. — Вып. 2. — С. 99—124.

3. О влиянии ионной бомбардировки на химическую активность металлических пленок. // Микроэлектроника. — 1932. — Т. 11. — Вып. 4. — С. 349—355.

4. Микрометаллургия в микроэлектронике. — М.: Металлургия, 1978.

5. Фундаментальные технологические ограничения интеграции элементов ЭВМ (Публикация заказного доклада 1979 г.) / Физико-технологические проблемы микроэлектронного приборостроения. — М.: Труды ИНЭУМ. — Вып. 99. — 1983.

6. Серебряное деревце // Химия и жизнь. — 1980. — № 9. — С. 80—85.

7. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. — М.: Мир., 1985.

8. Следующая компьютерная революция // В мире науки. — 1988. — № 12 (Специальный выпуск).

9. Полупроводниковая промышленность: попытка прогноза до 2000 г. // Электроника. — 1987. — № 7 (Специальный выпуск).

10. Суперкристаллы — главная новинка года. // Электроника. — 1986. — № 4.

11. ТИИЭР (Труды американского института инженеров по электронике и радиотехнике. / Пер. с англ.). — 1986. — Т. 74. — № 12. Специальный выпуск, посвященный перспективам развития микроэлектроники, микротехнологии, вычислительной техники.

12. Дорфман В. Ф. Синтез твердотельных структур. — М.: Металлургия, 1986.

13. Дорфман В. Ф., Иванов Л. В. ЭВМ и ее элементная база. Развитие и оптимизация. — М.: Радио и связь, 1988.

14. Дорфман В. Ф. На рубеже тысячелетий. — М.: Знание, 1982.

15. Drexler E. K. Engines of creation. Garden City [NY]. Anchor Press. — 1986. — 298 p.

Лорд Н. и др. Вычислительные машины будущего. — М.: Мир, 1987.

Сообщают. Снова Вакуумные лампы. Миниатюрные вакуумные лампы снова начинают находить применение в технике. Сейчас разрабатываются вакуумные лампы, которые в ряде устройств должны превосходить по характеристикам твердотельные приборы. Ожидают, что вакуумная микроэлектроника быстро догонит полупроводниковую.

Скорость перемещения электронов в вакуумных лампах значительно быстрее, чем в кремнии или арсениде галлия, что позволяет широко использовать вакуумные лампы старых конструкций. В новых вакуумных лампах используется холодный катод, заменивший подогреваемый катод в прежних лампах, который довольно быстро разрушался. И, хотя новые лампы не полностью заменят транзисторы, их можно использовать в плоскопанельных дисплеях компьютеров и телевизоров благодаря малым размерам и хорошей яркости и четкости изображения.

«Design News» (США), том 44, № 12, 1988 г., стр. 15.

ЗАДАЧИ УЧЕНЫХ

Информатизация общества на основе внедрения вычислительной техники и новых информационных технологий во все сферы жизни является одним из главных факторов научно-технического прогресса. Эта проблема в последнее время приобретает важнейшее значение.

В совместном центре Московского физико-технического института и Института автоматизации проектирования АН СССР наряду с подготовкой высококвалифицированных научных и инженерных кадров ведутся работы по решению прикладных задач для народного хозяйства, в числе которых видное место занимают исследования в области информационных технологий. 26 сентября этот центр посетил секретарь ЦК КПСС О. Д. Бакланов.

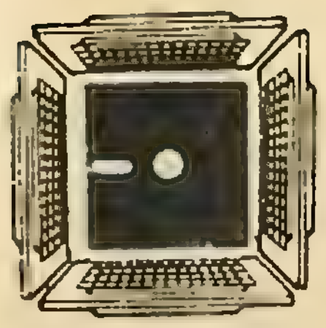
Рассмотрены вопросы увеличения вклада академической и вузовской науки в ускорение научно-технического прогресса и развития перспективных форм обучения. Особое внимание обращено на необходимость усиления работ по созданию и внедрению в различные области народного хозяйства информационных технологий, в том числе интеллектуальных систем. Эти прогрессивные направления призваны обеспечить ускоренное развитие передовой науки и повышение эффективности общественного производства.

В президиуме АН СССР состоялось совещание, на котором рассмотрено состояние дел в области персональных ЭВМ и комплексных систем автоматизированного проектирования в машиностроении. Был обсужден опыт совместной разработки учеными Академии наук с ПО «Завод имени Лихачева» САПР. Намечены меры по ускорению создания более эффективных средств и широкого освоения их выпуска.

При обсуждении хода компьютеризации народного образования было отмечено отставание в выпуске персональных вычислительных машин, в том числе школьных. Обеспеченность этой техникой учебных заведений не отвечает современному этапу перестройки народного образования. Обращено внимание Академии наук СССР, Госкомитета СССР по вычислительной технике и информатике и промышленных министерств на необходимость усиления фундаментальных исследований в области вычислительной техники, особенно программного обеспечения, и внедрения их результатов в практику.

В рассмотрении вопросов участвовали заместитель Председателя Совета Министров СССР И. С. Белоусов, президент АН СССР Г. И. Марчук, заведующий отделом ЦК КПСС О. С. Беляков, председатель Госкомитета СССР по вычислительной технике и информатике Н. В. Горшков, вице-президент АН СССР Е. П. Велихов, другие партийные и хозяйственные руководители.

Известия 27 сентября 1988 г. (ТАСС)



В условиях мощного информационного взрыва, когда тенденции роста объемов информации, приходящихся на каждого человека, значительны, получение необходимой информации становится чрезвычайно важным фактором, влияющим на качество принимаемых решений в различных областях человеческой деятельности.

В. С. БАРСУКОВ,
О. В. ТАРАСОВ

НОВАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ: ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ, КОНЦЕПЦИЯ БАНКА ЗНАНИЙ, ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Объективная необходимость расширения и углубления сферы автоматизации порождает ряд проблем, важнейшей из которых является проблема, связанная с ростом необходимого числа программистов. Существо этой проблемы состоит в следующем. Условно специалистов в области информатики, впрочем и саму эту область, можно разделить на сферу, относящуюся к созданию технических средств (в англоязычной литературе используется термин hardwere), и сферу, относящуюся к созданию программного обеспечения для этих средств (softwere) — программистов. Анализ тенденций затрат на создание таких средств показывает, что затраты на проектирование программных средств, являющихся, образно выражаясь, «душой» компьютеров, несоизмеримо выше затрат на создание собственно ЭВМ. С другой стороны, расширение сферы автоматизации и объективная необходимость в создании сложных комплексов автоматизации обусловливает возрастание потребностей в еще большем числе программистов. Если принять современные темпы роста этих потребностей, то уже в начале следующего столетия фактически все люди должны стать программистами, т. е., кроме своей основной специальности, освоить еще и достаточно трудную, сложную и многообразную специальность — программирование.

Решение данной проблемы в настоящее время ведется в рамках двух основных направлений. Первое направление состоит во введении в широких масштабах компьютерной грамотности, которая становится второй грамотностью человека. Однако в этом направлении решение данной проблемы может быть осуществлено лишь в ограниченных рамках, поскольку полное знание деталей и особенностей построения сложных программных систем под силу только профессионалам-программистам. Тем не менее широкое внедрение в практику работы школ предметов по освоению программирования создает определенные предпосылки и соответствующие условия, облегчающие решение проблемы.

Второе направление связано с «приближением» человека к ЭВМ, т. е. с созданием таких интеллектуальных языков высокого уровня и поддерживающих их программных и технических средств, которые непосредственно ориентированы на неподготовленных пользователей. Создание подобных средств позволяет реализовать тезис «программирование без программистов» — с таким названием вышла в начале 80-х годов книга известного американского специалиста в области информатики Дж. Мартина. Указанные средства и лежат в основе новой информационной технологии программирования, с которой связываются такие понятия, как искусственный интеллект и банк знаний. Прежде чем рассмотреть особенности данной технологии, совершим краткий экскурс в историю развития программирования.

При зарождении информатики, да и в настоящее время, фундаментальной моделью вычислений, которая лежала и лежит в основе командных языков ЭВМ и многих современных языков программирования, таких, например, как АЛГОЛ, ФОРТРАН, ПЛ/1, АДА и многих других, является модель вычислений, предложенная фон Нейманом. Обобщенная схема этой модели представлена на рис. 1. Она включает в себя память, состоящую из некоторых однородных элементов (ячеек, либо байтов и т. п.), в которой располагается программа и данные. Кроме памяти, в состав этой модели входит также процессор, который выполняет роль вычислителя.

Циклы работы процессора выполняются вплоть до завершения программы. Для данной модели характерными являются два важных момента. Первый из них состоит в том, что управление процессором вычисления осуществляется непосредственно командами, записанными в программе. Поэтому ЭВМ с архитектурой, ориентированной на такую модель, в современной литературе называют машинами, основанными на потоке управления (в отличие от ЭВМ с потоком данных). Вторая особенность данной модели состоит в том, что выбор данных осуществляется по соответствующим адресам.

Как уже отмечалось, эта модель лежит в основе многих языков программирования. Сложность написания программ достаточно высока, как это нетрудно заметить из приведенных выше особенностей функционирования модели фон Неймана. Для программирования, во-первых,

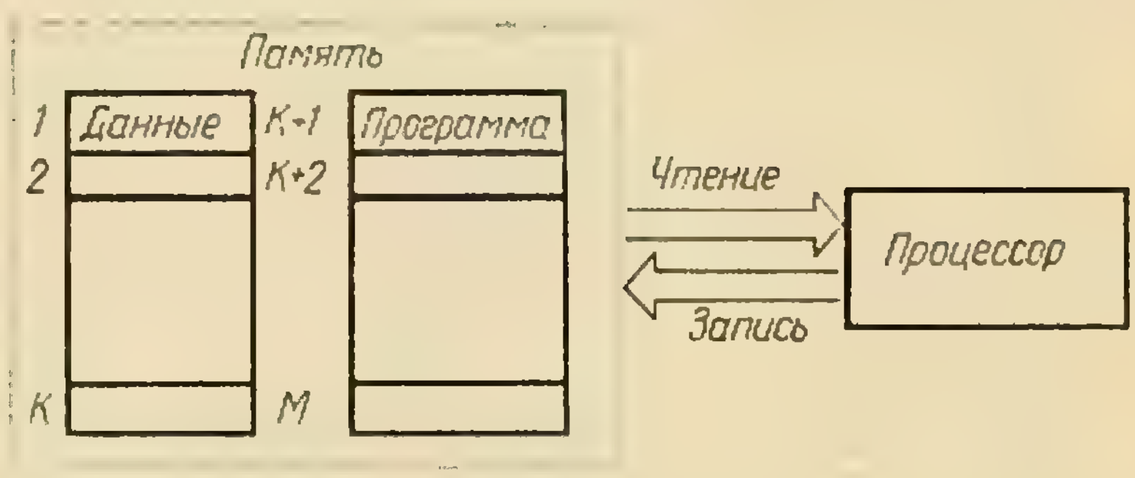


Рис. 1

необходимо детально расписать расположение данных в памяти, а во-вторых, подробно, шаг за шагом расписать последовательность преобразования исходных данных в результирующие. Это требует большой внимательности и кропотливости при написании программ. При этом чем выше сложность программного продукта, тем сложнее написание программ. По существу, языки рассматриваемого типа определяют программу в терминах того, как должна быть достигнута цель обработки, что создает практически непреодолимую преграду для непрофессионалов.

В настоящее время получили всое развитие языки более высокого уровня, чем те, что основаны на фон Неймановой модели вычислений. Истоки этих языков восходят к логике Аристотеля и его аксиоматизации геометрии. Бурное развитие аксиоматический подход к формализации математических теорий получил на рубеже XIX и XX веков и в начале нынешнего столетия. Для аксиоматизации используется аппарат математической логики, выступающий в роли метаинструмента, с помощью которого формализуются математические теории. Такой аппарат значительно выше по «интеллектуальности», чем модель Неймана или ее более «теоретический» эквивалент — машина Тьюринга. Об этом подробнее будет сказано далее. Одной из основных задач, которые стали перед последователями по аксиоматизации, названа задача получения некоторой механической процедуры, позволяющей доказывать либо опровергать какое-либо утверждение исследуемой математической теории. Впоследствии, однако, оказалось, что для достаточно мощных математических теорий существуют такие утверждения, которые не могут иметь ни их доказательство, ни их опровержение. Это положение в виде теории о неполноте впервые было сформулировано Гёделем в 30-е годы нашего столетия. Наглядный тому пример — теорема Ферма в арифметике, доказательство или опровержение которой до настоящего времени не получено.

Тем не менее оказалось, что можно построить процедуру, позволяющую доказать какое-либо утверждение, если это утверждение действительно является теоремой. Практическая реализация этого положения нашла применение в исследованиях по искусственному интеллекту, получивших свое развитие в 50—60-х годах.

Своим названием это направление исследований обязано тому, что основная цель состояла в имитации на ЭВМ творческих способностей человека. При решении одной из задач в рамках таких исследований получают ответ на «трудные» задачи. С точки зрения математической логики решение задачи сводится к доказательству какой-либо теоремы в рамках набора аксиом, определяющих условия решения задачи. Первые программы доказательства теорем обладали чрезвычайно низкой эффективностью вследствие большого объема переборов аксиом и теорем. Вскоре, однако, Робинсоном был предложен метод резолюции, который и по настоящее время остается одним из основных методов доказательства в системах искусственного интеллекта. Следует отметить, что искусственный интеллект в начале своего развития никоим образом не связывался с технологией программирования. И только позже пришло понимание того, что искусственный интеллект содержит в себе ряд идей, сфера использования которых распространяется на всю технологию программирования. Ядро этих идей составляет концепция банка знаний. Рассмотрим существо этой концепции более детально.

Знания в самом общем виде, видимо, могут быть определены как некоторые отображения закономерностей, присущих той или иной предметной области. Вообще говоря, программы, выраженные в понятиях фон Неймановой модели вычислений, также представляют собой некоторые знания, записанные в определенной форме. Однако такие знания вносятся только подготовленными людьми — программистами. В концепции же банка знаний предполагается, что процессы внесения новых знаний в ЭВМ могут осуществляться достаточно легко и просто непосредственно пользователями. Поэтому первое положение этой концепции состоит в наличии языков представления знаний высокого уровня. По существу, языки, ориентированные на пользователя, должны описывать «что» необходимо получить в результате обработки, в отличии от процедурных фон Неймановых языков, описывающих «как» необходимо достичь цели обработки. Такое представление позволяет освободиться от ненужных подробностей в описании процесса достижения цели, концентрируя внимание на существе вносимых знаний. Такого рода языки существуют и используются в настоящее время в ряде действующих систем.

Роль своеобразного переводчика представлений базы знаний в язык, понятный ЭВМ, выполняет интерпретатор базы знаний, реализующий функции механизма логического вывода. Такой перевод, по существу, представляет собой последовательность действий, выполняемых ЭВМ. Иными словами, перевод есть отображение представлений из того, что необходимо сделать, в представление, как необходимо выполнить. Наличие интерпретатора базы знаний, обеспечивающего их обработку, составляет второе положение данной концепции. База знаний и ее интерпретатор, реализованные в виде программных средств либо аппаратно, и составляют банк знаний.

Концепция банка знаний в настоящее время широко используется в автоматизированных системах различного назначения. Ее реализация знаменует новый этап в новой технологии программирования, существо которого состоит в реальном приближении пользователей к ЭВМ: программирование осуществляется непосредственно пользователями, которым предоставляются инструментальные средства высокого уровня — язык и его интерпретатор.

Реализация данной технологии позволяет решить, кроме главной проблемы, указанной выше, также и ряд дополнительных, таких, например, как проблема создания адекватного программного обеспечения и проблема его сопровождения, которые остро стоят при использовании традиционной технологии программирования. Корни указанных проблем состоят в том, что процесс программирования при традиционной технологии представляется в виде цепочки преобразований одних представлений в другие: от пользователя к системному аналитику, от не-

го к алгоритмисту, от алгоритмиста к программисту. При таких отображениях часто теряется суть требований пользователя к системе. Кроме того, возможны ситуации различной интерпретации этих требований. И наконец, в процессе разработки, которая занимает достаточно длительное время, возможны изменения представлений пользователя. Вследствие этого возникает необходимость в модификации системы, которая в рамках традиционных языков программирования представляет собой трудоемкий процесс.

Новая информационная технология позволяет снять эти проблемы за счет сокращения «расстояния» между пользователем и ЭВМ до минимума — пользователь имеет непосредственный доступ к ЭВМ на языках высокого уровня и в принципе сам способен проектировать систему.

Развитие информационной технологии может быть представлено в виде совокупности этапов, каждый из которых характеризуется определенными параметрами, основные эти этапы приведены в таблице. Начальный этап эволюции технологии (1950—1960 гг.) характерен тем, что в основе средств взаимодействия человека и ЭВМ лежали языки, в которых программирование велось в терминах того, как необходимо достичь цель обработки. На этом и последующих этапах (до появления интеллектуальных языков высокого уровня) ЭВМ доступна только профессионалам-программистам. Начинают создаваться языки алгоритмического типа, такие, как ФОРТРАН и АЛГОЛ. Однако в большинстве случаев программирование осуществлялось непосредственно с использованием командных языков ЭВМ. При этом взаимодействие программистов с ЭВМ осуществлялось в диалоговом монопольном режиме.

Следующий этап (1960—1970 гг.) развития информационной технологии характеризуется созданием операционных систем, позволяющих вести обработку нескольких заданий, формируемых различными пользователями. Основная цель при этом состояла в обеспечении наибольшей загрузки машинных ресурсов. Здесь также использовались алгоритмические языки, ориентированные на ту или иную предметную область.

Третий этап характерен качественным изменением критерия эффективности автоматизированной обработки данных. Если на первых этапах в качестве такого критерия выступали (по всей видимости, в силу ограниченной области использования ЭВМ) машинные ресурсы, то в последующем основным ресурсом стали человеческие ресурсы по разработке и сопровождению программного обеспечения. Область использования вычислительной техники к этому этапу была уже достаточно обширна и включала в себя ряд сложных задач и проблем. Кроме того, стали разрабатываться и внедряться в практику не только большие ЭВМ, но и более дешевые мини-ЭВМ, что позволило в основном решить проблему получения необходимых ресурсов ЭВМ. С целью более быстрой разработки программного обеспечения на этом этапе использовался интерактивный режим взаимодействия не-

Таблица

Основные этапы эволюции информационной технологии

Годы	Мировой парк ЭВМ	Типовой режим использования	Средство связи пользователя с ЭВМ	Язык связи с ЭВМ	Язык программирования	Основной тип ЭВМ	Критерий эффективности автоматизированной обработки данных	Ключевые технологические решения
1950 — 1960	10 тыс.	Диалоговый монопольный	Двоичный пульт, перфокарты	Коды ЭВМ	Коды ЭВМ Ассемблер Алгол Фортран	Большие ЭВМ	Машинные ресурсы: число тактов ЭВМ, объем памяти для выполнения программы	Алгоритмические язык и программирование
1960 — 1970	100 тыс.	Пакетный	Перфокарты	Язык управления, заданный ОС	Фортран Кобол Ассемблер	Большие ЭВМ	Машинные ресурсы, необходимые для выполнения потока программ	Пакетные СС, оптимизирующие трансляторы
1970 — 1980	1 млн.	Интерактивный (разделенный во времени)	Алфавитно-цифровой дисплей	Командный язык ОС	Кобол Бейсик Фортран	Мини-ЭВМ	Человеческие ресурсы: трудоемкость разработки сопровождения программ	Интерактивные ОС, структурированные языки программирования
1980 — 1990	100 млн.	Диалоговый монопольный	Цветные графические дисплеи	Бейсик, Фортран, проблемно-ориентированные языки высокого уровня		Персональные ЭВМ	Человеческие ресурсы: трудоемкость формирования баз знаний	Технология представления и обработки знаний

сколько пользователей с ЭВМ, поддерживаемый интерактивными операционными системами. Однако эти технологические решения, в целом поднявшие уровень технологии разработки программного обеспечения, не позволили решить проблему человеческих ресурсов. Разрыв между объемами автоматизации и общим количеством программистов продолжал возрастать.

Четвертый этап знаменует новый качественный скачок в технологии разработки программного обеспечения, открывающий возможность решения указанной проблемы. Его суть сводится к тому, что центр тяжести технологических решений с совершенствования средств программистов переносится на создание средств, обеспечивающих взаимодействие пользователей с ЭВМ на этапах создания программного продукта. Ключевым звеном новой информационной технологии становится представление и обработка знаний. Получают свое развитие языки представления знаний, позволяющие непосредственно пользователям вносить свои знания в ЭВМ и в дальнейшем использовать их при решении конкретных задач. Индустрия знаний стала широко внедряться в различные области создания прикладных информационных систем: в настоящее время создаются интеллектуальные пакеты прикладных программ, базы данных, экспертные системы. Этот этап характеризуется также созданием и использованием персональных компьютеров. Создаются технические предпосылки для применения ПЭВМ в широком масштабе непосредственно потребителями информации — пользователями.

Рассмотрим более детально одну их перспективных и бурно развивающихся сфер использования новой технологии, связанную с проектированием и использованием экспертных систем. Их широкое распространение, с одной стороны, обусловлено появлением этой технологии, позволяющей синтезировать методы логического вывода, моделирующие «разумные умозаключения», характерные для человека. С другой стороны, появление экспертных систем является откликом на потребность практики — в силу ограниченности наших знаний в предметных областях оказывается невозможным построение формальных моделей принятия решения во многих предметных областях, основанных, например, на аппарате исследования операций. К примеру, в области медицины многие закономерности функционирования человеческого организма науке не известны. Тем не менее в этой области профессионалы используют для принятия решений знания, основанные на опыте их практической деятельности. По существу, экспертные системы и ориентированы на использование такого рода знаний: они позволяют достаточно быстро вносить знания высококвалифицированных специалистов в ЭВМ и в дальнейшем предоставлять эти знания другим специалистам при решении ими конкретных задач.

Общая структура экспертных систем, присущая всем проектируемым и действующим системам, представлена на рис. 2. В состав экспертной системы входит база знаний и блоки пополнения знаний, формирования ответа и объяснения. База знаний представляет собой совокупность правил, определяющих факты и закономерности предметных областей. Эти правила определяются на языках высокого уровня — языках представления знаний. Основной критерий эффективности того или иного языка представления знаний, определяющего модель базы знаний, — его адекватность (соответствие) предметной области использования экспертной системы. В настоящее время признанным является тот факт, что пока не существует универсального языка представления знаний, адекватного любым проблемным областям и концептуальным моделям знаний в этих областях. Аналогичная ситуация сложилась в свое время в области создания языков программирования, основанных на модели фон Неймана. Поэтому для каждого конкретного применения может быть разработан наиболее подходящий язык представления знаний.

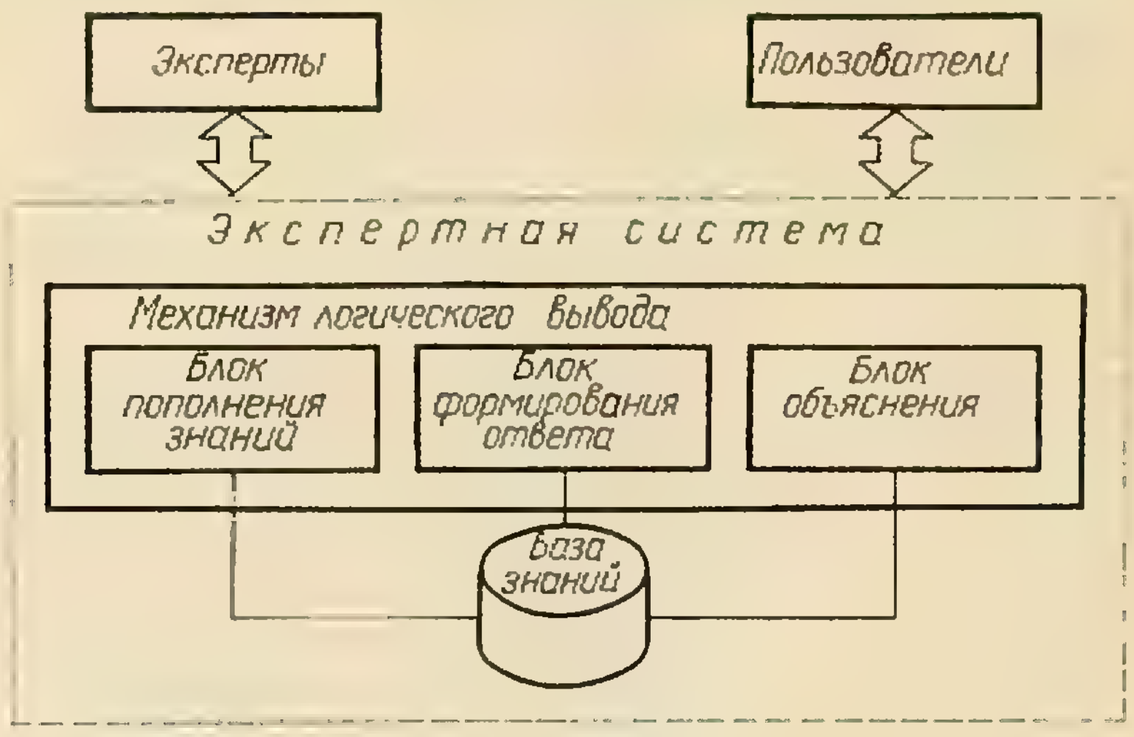


Рис. 2

В основе блоков, входящих в состав экспертной системы, лежит механизм (метод) логического вывода. Своим названием этот механизм обязан тому, что база знаний определяется в виде логических выражений либо выражений, которые могут быть приведены к таковым. В блоке пополнения знаний логический вывод используется для определения новизны, полноты и непротиворечивости поступающих в систему знаний данных. Формирование ответов непосредственно реализуется механизмом вывода. И наконец, блок объяснения ответов непосредственно использует структуру доказательства, которое строится этим механизмом. Последний блок относится к отличительной особенности экспертных систем. Объяснительные способности экспертных систем позволяют пользователям уяснять смысл того или иного ответа, формируемого системой, и проводить оценку этой информации для окончательного принятия решений.

Широкое распространение в настоящее время для представления знаний получил формальный аппарат логики Хорна. Подход, основанный на этой логике, реализован в виде языка ПРОЛОГ (Programming in Logic — дословно «программирование в логике») и поддерживающих его программных средств, которые используются в качестве составной компоненты системного программирования в проекте ЭВМ 5-го поколения (см.: Вычислительная техника и ее применение — 1988. — № 7).

Следует отметить, что мировой рынок сбыта экспертных систем в настоящее время имеет тенденцию к увеличению спроса на них. ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ знаний, осуществляемое с использованием экспертных систем, в недалеком будущем существенно повлияет на сферу деятельности людей, освобождая их от большого объема затрат по сбору знаний для принятия решений.

Рассмотрим на конкретном примере организацию взаимодействия пользователя с экспертной системой. Предметная область этой экспертной системы — ботаника. Предположим, что фрагмент базы знаний содержит следующий набор правил [5]:

1. ЕСЛИ класс — голосеменные
   И форма листа — чешуеобразная
   ТО семейство — кипарисовые
2. ЕСЛИ класс — голосеменные
   И форма листа — иглоподобная
   И конфигурация — хаотическая
   ТО семейство — сосновые
3. ЕСЛИ класс — голосеменные
   И форма листа — иглоподобная
   И конфигурация — 2 ровных ряда
   И есть серебристая полоса
   ТО семейство — сосновые
4. ЕСЛИ класс — голосеменные
   И форма листа — иглоподобная
   И конфигурация — 2 ровных ряда
   И нет серебристой полосы
   ТО семейство — болотный кипарис
5. ЕСЛИ тип — деревья
   И широкая и плоская — да
   ТО класс — покрытосеменные
6. ЕСЛИ тип — деревья
   И широкая и плоская — нет
   ТО класс — голосеменные
7. ЕСЛИ стебель — зеленый
   ТО тип — травянистые
8. ЕСЛИ стебель — древесный
   И положение — стелющееся
   ТО тип — лианы
9. ЕСЛИ стебель — древесный
   И положение — прямостоящее
   И один основной ствол — да
   ТО тип — деревья
10. ЕСЛИ стебель — древесный
    И положение — прямостоящее
    И один основной ствол — нет
    ТО тип — кустарниковые.

Предположим, что перед пользователем стоит задача классифицировать некоторое растение, которое характеризуется известными признаками. Эти признаки вводятся пользователем в экспертную систему, на основании которых с учетом правил базы знаний определяется тип растения. Сеанс диалога может иметь следующий вид:

ЭС: Какой у растения стебель?
Пользователь: Древесный.
ЭС: Каково его положение?
Пользователь: Прямостоящий.
ЭС: Растение содержит один основной ствол?
Пользователь: Да.
ЭС: Лист у растения широкий и плоский?
Пользователь: Нет.
ЭС: Форма листа — иглоподобная?
Пользователь: Да.
ЭС: Конфигурация игл — хаотическая?
Пользователь: Да.
ЭС: Ваше растение — дерево голосеменного класса семейства сосновых.

Этот вывод сделан на основании правил 9, 6 и 2 базы знаний. Если пользователь заинтересуется, почему сделаны такие выводы, то экспертная система выдаст эти правила и укажет соответствие между ответами пользователя, правилами и ответом экспертной системы. Например, вывод о том, что растение — голосеменного класса, может быть обоснован так.

Поскольку растение типа «деревья с неширокими и неплоскими листьями» относится к классу «голосеменной», а по результатам опроса установлено, что растение — дерево (в соответствии с правилом 9) с неширокими и неплоскими листьями, то ваше растение относится к классу голосеменных. В заключение этого примера отметим, что рассмотренные правила могут быть формально представлены на любом прологоподобном языке.

Кроме проблемно-ориентированных экспертных систем, в состав которых входят как программные средства поддержки различных языков представления знаний, так и конкретная база знаний, создаются также так называемые пустые экспертные системы, некоторые из которых приведены в табл.

Такие экспертные системы не содержат в своем составе базы знаний, ее наполнение осуществляется в ходе выявления знаний в определенной предметной области. По существу, «пустые» экспертные системы представляют собой

Таблица

Название ЭС	Описание	Разработчик
EMYCIN	Ориентированная на правила	Stanford University
EXPERT	Ориентированная на правила	Rutgers University
ROSIE	Ориентированная на правила, процедуры. Естественный язык. Инструментальные средства проектирования ЭС	Rand Corporation
SR 2	Ориентированная на фреймы	Carnegie-Mellon University
LOOPS	Ориентированная на правила, объекты, процедуры. Инструментальные средства проектирования ЭС	Xerox Parc
СПЭИС	Ориентированная на правила, фреймы, процедуры. Инструментальные средства проектирования экспертных систем	ВНИИ СИ АН СССР
ПИЭС	Ориентированная на фреймы, продукции. Инструментальные средства проектирования ЭС	ВЦ АН СССР

инструментальные средства высокого уровня, позволяющие создавать конкретные варианты экспертных систем. Например, с помощью «пустой» экспертной системы EMYSIN были созданы проблемно ориентированные системы PLANT/cdp, SACON, BLUE BOX, PUFF, из которых две экспертные системы (BLUE BOX и PUFF) в области медицины.

С помощью отечественной инструментальной системы СПЭИС была разработана экспертная система СПЭИС/МОДИС-2, позволяющая осуществлять диагностику симптоматической гипертонии [3]. Цель работы состояла в создании экспертной системы диагностики различных заболеваний, приводящих к повышению артериального давления, от которого, по данным ВОЗ, страдает около 10% населения Земли. На этапе сбора начальной информации МОДИС-2 задает около 30 вопросов. В дальнейшем эта информация используется для формирования гипотез о причинах заболевания, при анализе которых система задает пользователю и др. вопросы. Ответы используются для подтверждения либо исключения гипотез. Время одного диагностического сеанса составляет в среднем 5—7 минут. Результатом является либо точное заключение о причине повышения артериального давления, либо диагноз, требующий дальнейшего уточнения, либо рекомендации на проведение целенаправленных исследований.

Говоря об использовании экспертных систем, следует также отметить две основные проблемы. Первая состоит в сложности извлечения знаний. Дело в том, что в некоторых случаях эксперты интуитивно принимают решения и не могут объяснить, почему было принято то или иное решение. Эта проблема, однако, не носит глобального характера: тренировка экспертов при извлечении знаний позволяет им систематизировать свои знания, что является позитивным моментом в плане разрешения проблемы. Социальный аспект связан с тем, что наличие знаний позволяет экспертам занимать определенные позиции и авторитет в той или иной области их деятельности. Утрата знаний в некотором смысле подрывает этот авторитет. Эта проблема, видимо, будет иметь решение в рамках экономических рычагов — знания, так же как и материальные предметы, обладают определенной стоимостью. С другой стороны, инструмент экспертных систем может быть использован в качестве механизма перераспределения функций между человеком и ЭВМ, т. е. механизма автоформализации знаний. Такой аспект использования экспертных систем позволит осуществлять принятие решений в более короткие сроки, что обеспечит их высокое качество.

Если в начале развития информатики создание языков программирования шло с ориентацией на командные языки ЭВМ и модель фон Неймана, лежащую в их основе, то в настоящее время все более стала прослеживаться обратная тенденция. Языки высокого уровня стали влиять на архитектуру и принципы построения ЭВМ. Результаты теоретического программирования, аккумулирующие в себе насущные потребности практики (например, языки новой информационной технологии), диктуют требования к техническим средствам информатики. Технические средства нетрадиционной архитектуры в настоящее время включают в себя достаточно широкий спектр ЭВМ, ориентированных на ту или иную модель вычислений. Широкое распространение в связи с развитием новой информационной технологии и языков искусственного интеллекта получают ЭВМ с потоком данных. Общая структура модели вычислений на основе потока данных представлена на рис. 3. Составляющие этой модели, как это видно из структуры, аналогичны составляющим модели фон Неймана, но принцип функционирования, а следовательно, и вся архитектура совершенно другие. Во-первых, набор команд, составляющих программу, является в общем случае неупорядоченным множеством, поскольку последовательность их выполнения определяется состоянием данных. Вторая особенность этой модели состоит в том, что данные выбираются не по адресам, а по их значению, т. е. здесь используется принцип ассоциативной памяти.

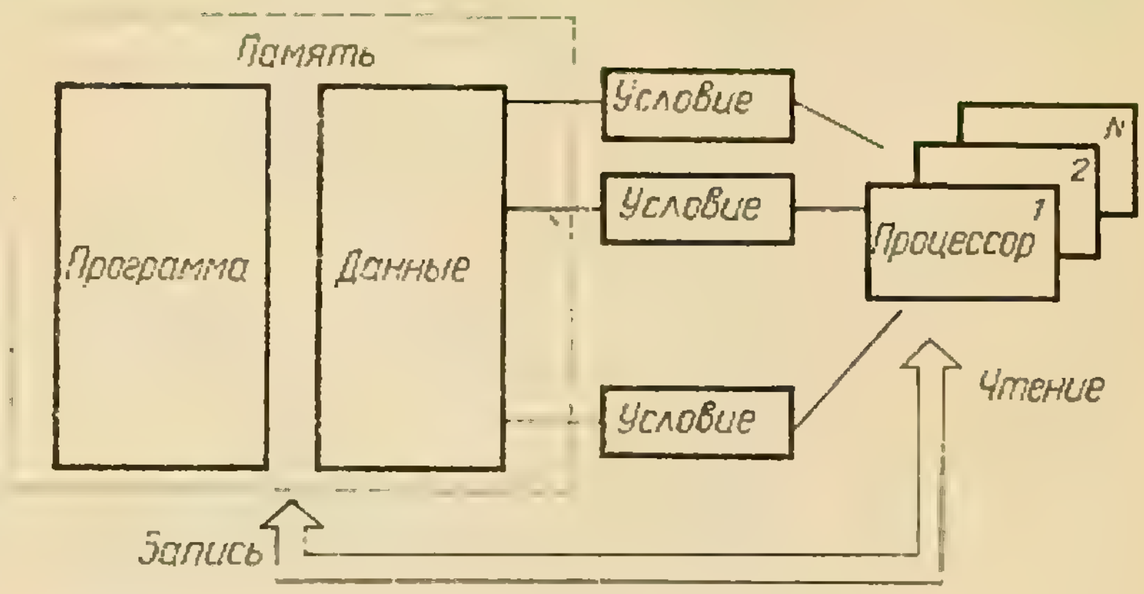


Рис. 3.

Один цикл функционирования такой модели состоит в следующем. На первом этапе определяются условия, по которым могут выполняться команды программы. К простейшим относится такое условие, как, например, наличие некоторых данных для выполнения команды. Если для какой-либо команды условия ее активизации выполняются, то происходит считывание необходимых данных (которые могут в принципе определяться этими условиями) по ассоциации, и результаты заносятся в память также по значению данных (т. е. адрес определяется исходя из значения данных). В случае если могут быть активизированы несколько команд, то они могут выполняться параллельно на различных процессорах. Выполнение программы завершается при исчерпании возможности активизации команд. Ориентация такой модели на параллельные вычисления позволяет достичь высокой эффективности в выполнении программы. Модель ЭВМ с потоком данных, как мог заметить внимательный читатель, моделирует логический вывод.

Говоря о новой информационной технологии, следует отметить, что единственным источником знаний является человек. При этом в системах, основанных на концепции банка знаний, реализуются функции дедуктивного вывода — от обобщенных знаний, представляемых в базе знаний, осуществляется переход к конкретным знаниям, которые формируются при решении заданной практической задачи.

В настоящее время получает свое развитие и другое направление использования концепции банка знаний — автоматический синтез знаний. Проблема синтеза знаний, или проблема индук-

тивного вывода, несомненно, более сложная и более глобальная, чем анализ уже синтезированных человеком знаний, что и происходит в экспертных системах. По существу, речь здесь идет о придании ЭВМ элементов творческого мышления, характерного для человека. О ее исчерпывающем решении не может быть и речи ни в ближайшее время, ни в обозримом будущем. Частное решение данной проблемы состоит в создании механизмов знаний в рамках отдельных проблемно ориентированных областей, в которых возможен синтез на основе некоторого набора правил, обладающих полнотой относительно возможных ситуаций создания знаний. Но прерогатива в формировании такого выбора правил остается опять-таки за человеком.

Возвращаясь к новой информационной технологии, следует отметить, что ее возможности «проникают» во все сферы информационной индустрии. Сейчас появляются сети ЭВМ, интегрирующие распределенные базы знаний. Создание таких сетей позволяет обеспечить доступ к необходимой информации в любой точке территории страны. Решение этой комплексной задачи требует теоретической и практической проработки всех проблем, начиная от создания соответствующих технических средств, обеспечивающих передачу и обработку информации, и кончая языковыми средствами взаимодействия человека и ЭВМ, некоторые из которых рассмотрены в данной статье.

Заинтересованному читателю

1. Фундаментальные исследования в области представления знаний / ВЦ АН СССР, ВИНИТИ, 1984.

2. Нильсон Н. Принципы искусственного интеллекта. — Мир, 1985.

3. Гелованн В. А., Ковригин О. В. Экспертные системы в медицине. — М.: Знание, 1987. — 32 с. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Математика, кибернетика»; № 3).

4. Громов Г. С. Национальные информационные ресурсы: проблемы промышленной эксплуатации. — М.: Наука, 1985. — 210 с.

5. Реальность и прогнозы искусственного интеллекта: Сб. статей. Пер. с англ. / Под ред. В. Л. Стефанюка. — М.: Мир, 1987. — 247 с.

XI ВСЕСОЮЗНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Удивляясь и восхищаясь достижениями вычислительной техники, информатики, микроэлектроники, оптоэлектроники, мы порой забываем, что они почти всегда базируются на физических исследованиях и открытиях в области полупроводников. Сегодняшняя микроэлектроника «питается» физическими концепциями, развитыми 10—20 лет назад, сегодняшние физические концепции будут определять лицо микроэлектроники 2000 года. Лучшие физические исследования, хотя бы контурно, очерчивают прикладные вопросы использования открытого явления, да и основы технологии создания новых приборов тоже закладываются физиками. Вот почему каждый форум физиков, специализирующихся в области полупроводников, приковывает пристальное внимание широкого круга научных работников и инженеров, занимающихся электроникой и информатикой. Конференция проходила с 3 по 5 октября 1988 г. в Кишиневе и собрала несколько сот участников, всего было представлено 362 доклада. Как всегда на подобных конференциях большой поток информации шел по линии дискуссий, кулуарных бесед, частных разговоров, сообщений о подобных зарубежных конференциях. Все это и сформировало те достаточно общие и естественно субъективные представления, которые стали основой для настоящих заметок.

Наиболее значительным, фундаментальным достижением последнего времени является открытие в 1986 г. высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), удостоенное Нобелевской премии. Известно, что сверхпроводимость экспериментально впервые наблюдалась в 1911 г. при гелиевых температурах, и за последующие 75 лет исследователи, создавая металлические сплавы различных составов (главным образом на основе ниобия), сумели продвинуться всего лишь до 20 К. В 60-е годы началось теоретическое обсуждение возможности ВТСП, при этом основные надежды связывались с двумерными сэндвич-структурами. Но вопреки предсказаниям теоретиков эффект был обнаружен в мелкодисперсной керамике типа LaSrCuO. В последующие год-полтора обследовано огромное количество металлоксидовых керамик, и по состоянию на середину 1988 г. наиболее высокая температура (160 К) получена у таллиевой керамики состава TlSrCaCuO. Многочисленные экспериментальные исследования и полезные обобщения выполнены в части структуры, проводимости, теплоемкости ВТСП-веществ. В частности, установлено, что по концентрации свободных носителей (3-5 · 10^{21} $см^{-3}$) эти материалы лежат на грани между полупроводниками и полуметаллами. Все они приобретают сверхпроводящие свойства только при легировании исходной основы примесями. Многое в сверхпроводниках — в физике, технологии получения — однотипно с полупроводниками, поэтому значительные усилия направлены на синтез ВТСП-полупроводников. Определенные надежды, в частности, связываются с тройными магнитными полупроводниками вида (S, Se), Cr(Cd, Hg, Cu, Zn): исследования, доложенные на конференции, подтвердили их общность с ВТСП-керамиками.

С развитием ВТСП связываются надежды на революционные изменения в электронике и электротехнике. Однако восторги начального периода, некая эйфория постепенно сменяются критической оценкой ситуации. Во-первых, после преодоления «азотной» температуры (77 К) дальнейшее продвижение «вверх» замедлилось — многие теоретические кривые «не хотят»

расти, упрямо выходя на участок насыщения. Во-вторых, ВТСП наблюдается лишь в тонких образцах при плотностях тока до 10^3 А/см^2, поэтому силовые кабели, рассчитанные на 10^5 А/см^2 (а именно это надо электротехнике), пока совсем неясно, как делать. Не менее проблематично обстоит дело и с ВТСП-микроэлектроникой, для которой рабочими являются локальные плотности тока — 10^6—10^7 А/см^2. А кроме всего, сверхпроводящие свойства керамики с течением времени, увы, исчезают, причем тем быстрее, чем выше температура. Это облачко может оказаться самым зловещим на голубом небе надежд. А пока физики выясняют свои отношения с ВТСП на дальних (от реальных электронных приборов) подступах, «кремниевая» микроэлектроника неудержимо рвется вперед. Сегодня ее прогресс определяет главным образом технология (см. табл. на пол. 5, 41), широкое промышленное освоение субмикронной технологии осуществится в течение ближайших 5—7 лет. По-видимому, основные процессы останутся принципиально теми же, что и раньше: газовая эпитаксия, ионная имплантация, плазмохимия и даже оптическая (разумеется, проекционная) литография, дополняемая электронно-лучевым способом изготовления фотошаблонов. При этом оптическая литография будет фактически доведена до своих предельных теоретических возможностей. Предполагается, что для генерации рисунка станут использоваться эксимерные лазеры с активным веществом XeCl (λ=308 нм), KrF (249 нм), KrCl (222 нм), ArF (193 нм). Это позволит снизить проектные нормы на размеры элементов интегральных схем до 0,5—0,7 мкм и в пределе до 0,25 мкм. Характерно, что основные научные проблемы становления этого процесса находятся за рамками «внутримикроэлектронных» дел — это создание необходимых эксимерных лазеров и широкоапертурной кварцевой (для пропускания ультрафиолета) оптики. И после развития субмикронной технологии основным элементом микросхемы останется все тот же МДП-транзистор; исследование арсенидо-галлиевых и кремниевых структур с длиной канала 0,25 мкм и даже 0,1 мкм показало, что принципы их работы и конструирования остаются практически неизменными, лишь быстродействие повышается до уровня 10 пс. Но прогресс неудержим, и уже сегодня достаточно определенно проступают контуры так называемой нанометровой технологии, для которой будут характерны размеры элементов 100—1 нм (в плане) и 10 — 1 нм (зо глубине). На место газовой эпитаксии придет молекулярно-лучевая, и ионная имплантация совместится с другими видами обработки поверхности полупроводника ионными лучами. Появился термин «имплантография», описывающий такое интегральное воздействие ионов. Фотолитография уступит место рентгеновской литографии, использующей синхротронное излучение.

Эта новая технология, по-видимому, повлечет за собой переход от сегодняшних биполярных и МДП-транзисторов к туннельным транзисторам. Этот прибор представляет собой сверхтонную гетероструктуру, в которой носители заряда проходят через эмиттерную и коллекторную гетерограницу посредством туннельного эффекта. Управление туннелирующим потоком осуществляется путем понижения или повышения соответствующих потенциальных барьеров. Принципиальные отличия туннельных транзисторов от традиционных заключаются в отсутствии «размазанности» областей объемного заряда, характерных для p-n-переходов; в использовании для переноса тока только основных носителей; в малости характеристических размеров элементов. Следствием всего этого является то, что быстродействие туннельных транзисторов «начинается» от цифры 1 пс и уходит в фемтосекундный диапазон. На конференции был представлен ряд докладов по туннелированию носителей заряда в субмикронных гетероструктурах, кроме того, подробно анализировались квантоворазмерные эффекты, существенные для таких структур. К сожалению, подавляющая часть докладов содержала лишь теоретические расчеты.

Наиболее впечатляющие результаты были доложены по лазерной тематике. Похоже, что в истории развития полупроводниковых лазеров начался третий этап. Первый (1963—1968 гг.), «догетеропереходный», период замечателен лишь фактом изобретения GaAs-лазера, который, увы, не удалось «заставить» генерировать ни при комнатной температуре, ни в непрерывном режиме — пороговые плотности тока были слишком велики ($I_{пор}$ =30 кА/см^2). В период 1968—1982 гг. получили всестороннее развитие гетеролазеры, главным образом на основе GaAlAs- и InGaAsP-соединений. В классической двойной гетероструктуре с толщиной активной области 0,1 мкм удалось достигнуть $I_{пор} \approx 1$ кА/см^2 и уверенно получить непрерывную генерацию при комнатной и повышенной (до 85 — 100° С) температурах. Достигнута высокая степень когерентности ($\Delta\lambda/\lambda < 10^{-11}$), создана широкая номенклатура ($P \leqslant 0{,}1$ Вт) маломощных гетеролазеров.

Третий период (1982 — 1983 гг.) открывают квантоворазмерные лазеры раздельного ограничения РО-лазеры). Уменьшение толщины активной области до 0,01 мкм показало, что, являясь надежной потенциальной «ямой» для электронов, она не в состоянии удержать в себе фотоны — световая волна неумолимо вытекает из столь тонкой области. В РО-лазере сильнолегированная тонкая (0,01 мкм) область «погружена» в нелегированную толстую» (0,3÷0,4 мкм) зону полупроводника — в центре локализуются электроны, по оболочке распространяется генерируемое излучение. Это позволило снизить плотность порогового тока до $I_{пор} \approx 0{,}1$ кА/см^2 и при этом достигнуть КПД ≈ 40—80%, а также сохранить незначительную расходимость луча (0,5°). Это же позволило увеличить длину активной зоны до 1,5—3 мм, тогда как в обычном гетеролазере она не может превышать 0,3—0,4 мм из-за значительного поглощения излучения в сильнолегированном полупроводнике. Следствием всего этого явилось на-

чало развития мощных полупроводниковых гетеролазеров. Созданы РО-лазеры с $P \approx 6$Вт, лазерные двумерные решетки, в которых 240 сынтегрированных вместе РО-лазеров с площади 10 мм^2 изучают 175 Вт непрерывной мощности! Это рекорды 1988 г., а на ближайшее время ставится задача получить матрицу с сечением 1 см^2, излучающую $P \approx 2$кВт. Это откроет возможности для развития нового лазерного приборостроения, нетрадиционных методов трансляции энергии, термоядерного синтеза, уникальной медицинской аппаратуры (докладчик продемонстрировал прожигание листа бумаги лучом полупроводникового лазера).

Разумеется, переход к сверхтонким активным областям потребовал развития новых технологий и выполнения оригинальных физических исследований. Низкотемпературные молекулярно-лучевая эпитаксия и газовая эпитаксия из металлоорганических соединений успешно дополнили развитую ранее жидкофазную эпитаксию. Получение в единой структуре десятков и сотен тонких (до 0,01 мкм) различных по составу полупроводниковых слоев с очень резкими границами («размытость» не более одного-двух моноатомных слоев) становится делом техники. Красивое физическое исследование, доложенное на конференции, показало, что получающиеся слои могут быть идеально совершенными — эффективность преобразования в них электронов в фотоны достигает 100% (при толщинах не менее 0,01 мкм). Похоже, что этот результат получен впервые в мире. В области маломощных лазеров большой интерес вызвал доклад о лазерных усилителях. Если в обычном двойном гетеролазере исключить торцевые зеркала (ряд возможных вариантов был предложен в докладе), то световой луч, проходя через такую структуру, может быть усилен. Экспериментально созданы лазерные усилители гигагерцевого диапазона с коэффициентом усиления $к = 10$—20 дБ при $\lambda = 0{,}85$ мкм и $к = 10$—12 дБ при $\lambda = 1{,}3$ мкм, исследованы пути получения одномодовых усилителей. Это открывает новые возможности в создании чисто оптических ретрансляторов для волоконно-оптических линий связи.

Процессы в тонких гетероструктурах характеризуются не только высокой эффективностью преобразования, но и сверхвысокой скоростью протекания. Если в двойной GaAlAs-гетероструктуре возбудить светом электронно-дырочную плазму, то ее «остывание» (переход в равновесное состояние) происходит за доли пикосекунды — столько же времени удерживается и просветленное состояние образца. Это открывает возможности для формирования лазерных импульсов фемтосекундной длительности.

Заметное место на конференции заняли халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП). Фотоструктурные превращения ХСП обеспечивают высокую разрешающую способность и высокую дифракционную эффективность. Это делает их привлекательными для использования в качестве фоторезистов и для применения в оптических реверсивных запоминающих устройствах. Для фотолитографии дополнительно интересно и то, что ХСП может служить источником легирования полупроводников, а также недавно открытый факт избирательного осаждения многих металлов на облученную и необлученную поверхности ХСП. Однако низкая чувствительность этих материалов является серьезным (и похоже, непреодолимым) препятствием на пути их широкого использования в микроэлектронике. А вот плоские и волоконные световоды на основе ХСП обещают ряд полезных и интересных свойств: прозрачность во многих ИК-областях, в том числе и для излучения CO_2-лазеров; возможность управляемого изменения прозрачностью путем электромагнитных и электронных воздействий на световод; обилие нелинейно-оптических эффектов при малых интенсивностях возбуждения.

Разумеется, описанное в этих заметках — наиболее приближенное к приборным аспектам электроники — не исчерпывает всего того, что было представлено на конференции. Очень много интересных и полезных докладов прозвучало и по диагностике материалов и структур, по новым методикам исследований, по другим вопросам, являющимся «внутренним» делом физиков. Атмосфера конференции была очень самокритичной, творческой, доброжелательной; появилось и кое-что новое, «перестроечное»: физики явно стремятся «продать» вырабатываемую продукцию. Но «ярмарка идей» не очень-то удалась: во-первых, среди слушателей почти не было «покупателей» — ведущих специалистов, руководителей отраслевых НИИ и заводов, и во-вторых (а может быть, именно это «во-первых»), не так много оказалось привлекательного «товара», да и тот слишком походил на зарубежный, с которого спороли «лейбл». В кулуарах с горечью вспоминали, что за рубежом фундаментальные исследования проводятся на крупных фирмах, и полет физической мысли подкрепляется самой совершенной технологией, так что доклад, как правило, оканчивается фотографией прибора на новом принципе. По такой же схеме работают и ведущие институты страны (ЛФТИ, ИОФАН, ИРЭ, ФИАН и др.), однако конференции в целом подобного подхода явно недоставало. Да и многие важные физические проблемы как-то остались в стороне: проблемы субмикронной и тем более нанометровой технологии, высокотемпературной и радиационно-устойчивой электроники, акусто- и интегральной оптики, нелинейной оптики полупроводников... Нередко исследователи «танцуют» не от задачи, а от тех материалов и методик, которыми лаборатория располагает, хотя давно уже очевидно, что ни к ВТСП, ни к свершениям в микро- или оптоэлектронике результаты этих исследований нас не приблизят.

Очередная XII конференция по физике полупроводников должна состояться в 1991 г.

Ю. Р. Носов

Т 38 **Технологическая** база информатики. — М.: Знание, 1989. — 48 с. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Вычислительная техника и ее применение»; № 2).
20 к.

В брошюре описаны этапы развития элементной базы вычислительной техники. Рассказ ведется не от хронологической последовательности событий, а от достижений физических пределов текущих технологических приемов. Рассматриваются не только достижения, но и перспектива развития до начала XXI века.
Брошюра рассчитана на широкий круг читателей.

1404000000 **ББК 73**

ISBN 5-07-000423-9

ТЕМА *СЛЕДУЮЩЕГО* **НОМЕРА:**

РАДИО ЭЛЕКТРОНИКА И СВЯЗЬ

Адаптивные методы пространственной обработки радиосигналов

***ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА* И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ**

Дружественное программное обеспечение

МАТЕМАТИКА КИБЕРНЕТИКА

Портреты бифуркаций

Научно-популярное издание

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БАЗА ИНФОРМАТИКИ

Гл. отраслевой редактор *Л. А. Ерлыкин*
Редактор *Б. М. Васильев*
Мл. редактор *Н. А. Васильева*
Художник *В. Н. Конюхов*
Худож. редактор *М. А. Гусева*
Техн. редактор *Т. В. Луговская*
Корректор *В. И. Гуляева*

ИБ № 10066

Сдано в набор 01.11.88. Подписано к печати 04.01.89. Т-01306. Формат бумаги 70×100$^{1}/_{16}$. Бумага офсетная. Гарнитура журнально-рубленая. Печать офсетная. Усл. печ. л. 3,90. Усл. кр.-отт. 8,45. Уч.-изд. л. 4,76. Тираж 66 194 экз. Заказ 2717. Цена 20 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 894702. Ордена Трудового Красного Знамени Калининский полиграфический комбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 170024, г. Калинин, пр. Ленина, 5.

Цена 20 коп.

Индекс 70195

Адрес подписчика:
Лен. 27-43

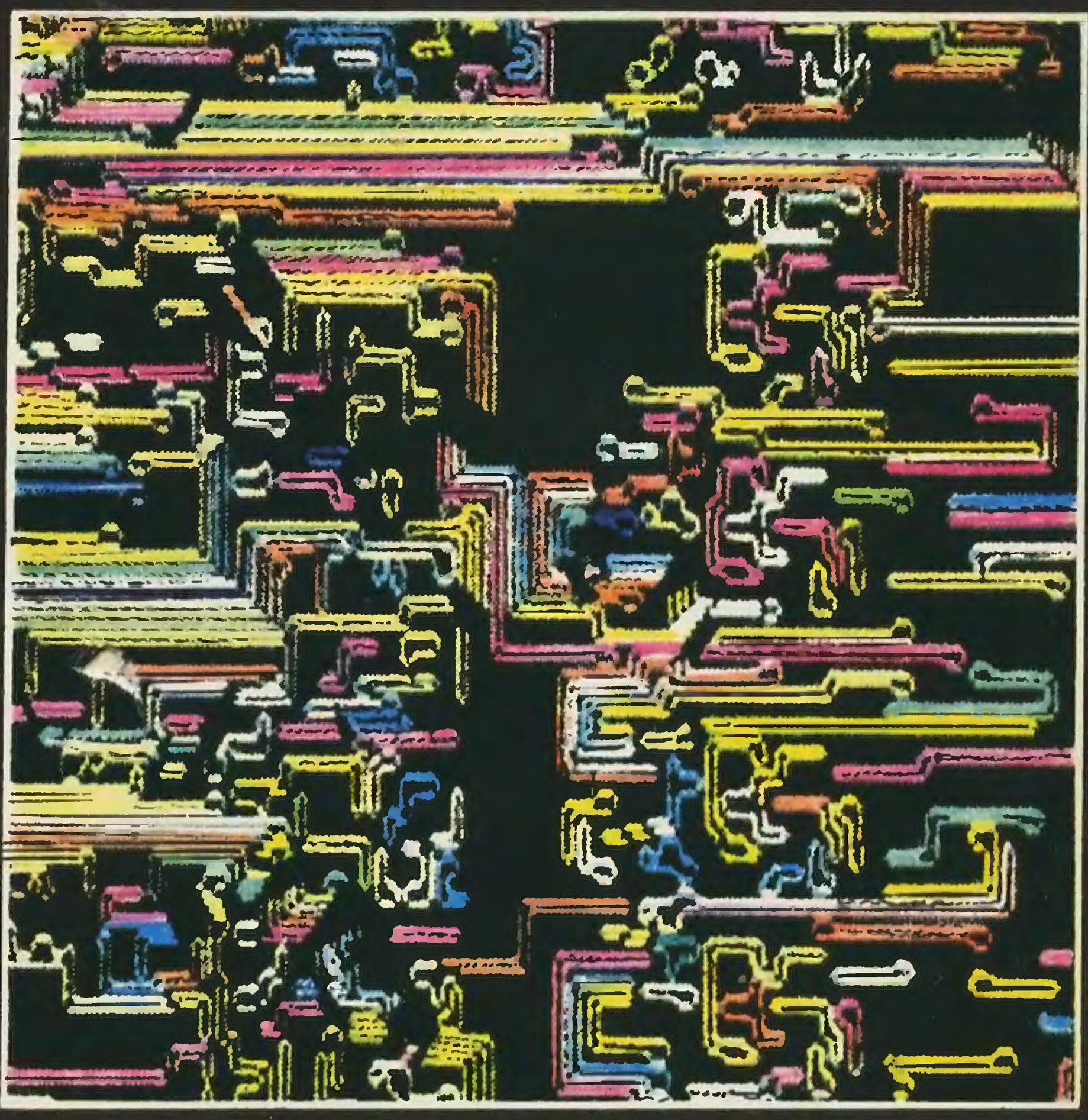
Издательство «Знание»

Подписная научно-популярная серия

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ

Остается загадкой "вопрос о том, каким образом удается построить столь совершенные архитектурные сооружения, имея под руками самый примитивный строительный материал... — триады кодовых знаков, которые миллиардами хранятся в ЭВМ на физических носителях".

Алан Кэй



Наш адрес: СССР, Москва, Центр, проезд Серова, 4